

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**PSYCHOAKUSTICKÉ VNÍMÁNÍ SHODNĚ  
INSTRUMENTOVANÝCH SOUZZVUKŮ RŮZNĚ  
ROZLOŽENÝCH VE STEREU**

PSYCHOACOUSTIC PERCEPTION OF EQUAL INSTRUMENTAL CHORDS DISTRIBUTED DIFFERENTLY IN  
STEREO

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Vojtěch Juren

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

**BRNO 2019**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

**Student:** Vojtěch Juren

**ID:** 174453

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### **Psychoakustické vnímání shodně instrumentovaných souzvuků různě rozložených ve stereu**

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Připravte sadu různých akordů hraných různým druhem signálu s nízkým, středním a vysokým počtem alikvótních složek. Akordy mohou být hrány přirozenými i umělými nástroji. Jednotlivé tóny akordů budou rozloženy odlišně na stereofonní ose, od úzkého pásma blízko středu po široké (100 % vlevo i vpravo), a budou použity různé kombinace různě barevných hlasů. Prostudujte metody experimentální psychoakustiky k hodnocení zvukových podnětů, navrhnete hodnocené parametry, škály pro jejich hodnocení a připravte dotazník pro poslechový test. Dále proveďte poslechové testy na ideálním vzorku více než 100 respondentů. Výsledky statisticky vyhodnoťte a dejte do souvislosti s jakostí tónu a rozložením hlasů ve stereofonní bázi.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Melka, A. Základy experimentální psychoakustiky. Praha: Akademie múzických umění, 2005. ISBN 80-733-043-0

[2] Štěpánek, J., Moravec, O., 2005 b. Barva hudebního zvuku a její slovní popis, Akademie múzických umění v Praze, Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU, ISBN 80-7331-031-7

**Termín zadání:** 1.2.2019

**Termín odevzdání:** 27.5.2019

**Vedoucí práce:** MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

**Konzultant:**

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá psychoakustickým vnímáním shodně instrumentovaných souzvuků různě rozložených ve stereu. Také se zabývá psychoakustickým vnímáním neshodně instrumentovaných souzvuků různě rozložených ve stereu. Práce představuje, co je psychoakustické vnímání, podle čeho se určuje barva zvuku, jak funguje maskování mezi zvuky a pro člověka. Dále jsou ukázány zkoumané souzvuky (akordy), které byly různě rozloženy ve stereu. Akordy při výzkumu poslouchalo 72 posluchačů. Tito posluchači podle zvolené škály hodnotili srozumitelnost nástrojů, kdy v rámci akordu vždy každý jednotlivý tón hraje jiný nástroj. Nástroje byly rozděleny do tří kategorií podle jejich tvorby vyšších harmonických složek. Posluchači také hodnotili srozumitelnost nástrojů. Data od posluchačů byla vyhodnocena psychoakustickou metodou sémantického diferenciálu a byly určeny závěry.

## KLÍČOVÁ SLOVA

akordy, barva zvuku, maskování, nástroje, posluchači, psychoakustika, stereo, vyšší harmonické složky

## ABSTRAKT

This thesis deals with psychoacoustic perception of equally instrumented chords distributed differently in stereo. Also this thesis deals with psychoacoustic perception of unequally instrumented chords distributed differently in stereo. The thesis shows what is psychoacoustic perception, according to what is sound color determined, how does masking work between sounds and for people. Next, it shows examined chords which were differently distributed in stereo. These chords were listened by 72 listeners. They did, according to given scale, evaluate intelligibility of instruments within the chord where every individual tone was played by different instrument. The instruments were categorized into three categories according to their creating higher harmonic components. Also, the listeners evaluated intelligibility of the chords. The data were evaluated with help of psychoacoustic method called semantic differential and the results were set.

## KLÍČOVÁ SLOVA

chords, sound color, masking, instruments, listeners, psychoacoustics, stereo, higher harmonic components

JUREN, Vojtěch. *Psychoakustické vnímání shodně instrumentovaných souzvuků různě rozložených ve stereu*. Brno, 2019, 75 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Psychoakustické vnímání shodně instrumentovaných souzvuků různě rozložených ve stereu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu MgA. Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále děkuji panu doc. Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph. D. za pomoc při měření kmitočtové odezvy použitých sluchátek. Také děkuji všem zúčastněným při poslechových testech.

Brno .....

.....

podpis autora

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 Psychoakustika</b>	<b>14</b>
<b>2 Barva zvuku</b>	<b>16</b>
<b>3 Intervaly a akordy</b>	<b>20</b>
3.1 Intervaly . . . . .	20
3.2 Akordy . . . . .	21
<b>4 Binaurální slyšení, maskování, stereo</b>	<b>23</b>
4.1 Binaurální slyšení . . . . .	23
4.2 Maskování . . . . .	24
4.2.1 Kmitočtové maskování . . . . .	25
4.2.2 Dočasné maskování . . . . .	26
4.2.3 Kritická pásma . . . . .	27
4.2.4 Binaurální maskování . . . . .	29
4.3 Stereo . . . . .	30
4.3.1 Stereo obraz . . . . .	30
4.3.2 The Phantom Center . . . . .	31
<b>5 Průběh výzkumu</b>	<b>32</b>
5.1 Základ výzkumu . . . . .	32
5.1.1 Výběr nástrojů . . . . .	32
5.1.2 Volba akordů . . . . .	32
5.1.3 Rozdělení akordů . . . . .	33
5.1.4 Nahrávání jednotlivých tónů nástrojů . . . . .	36
5.1.5 Pojmenování akordů . . . . .	36
5.1.6 Určení pořadí přehrávaných akordů . . . . .	36
5.1.7 Výběr posluchačů . . . . .	39
5.1.8 Zařízení pro přehrání a úpravy před pilotním výzkumem . . . .	40
5.2 Pilotní výzkum . . . . .	40
<b>6 Prostředí Matlab</b>	<b>41</b>
6.1 Analýza vyšších harmonických složek . . . . .	41
6.2 Dotazník v grafickém prostředí Matlab . . . . .	41

<b>7</b>	<b>Vyhodnocení dotazníku</b>	<b>44</b>
7.1	Metoda sémantického diferenciálu . . . . .	44
7.2	Výsledky . . . . .	45
7.2.1	Kytara . . . . .	45
7.2.2	Akordy <i>H</i> dur . . . . .	46
7.2.3	Klastr . . . . .	47
7.2.4	Nástroje z kategorie M . . . . .	48
7.2.5	<i>A7 sus4</i> , <i>C phryg v.7</i> . . . . .	49
<b>8</b>	<b>Spektra použitých nástrojů</b>	<b>52</b>
8.1	Akordy <i>H</i> dur . . . . .	52
8.2	Klastr . . . . .	55
8.3	Nástroje z kategorie M . . . . .	57
<b>9</b>	<b>Závěr</b>	<b>63</b>
	<b>Literatura</b>	<b>65</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>67</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>68</b>
<b>A</b>	<b>Přílohy</b>	<b>69</b>
<b>B</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>75</b>



# Seznam obrázků

4.1	Pozice maxima kmitání bazilární membrány v závislosti na kmitočtu. [5]	25
4.2	Obálka kmitání bazilární membrány pro různé kmitočty a stejnou intenzitu signálu. [5]	25
4.3	Křivka maskování harmonického signálu. [5]	26
4.4	Křivka dočasného maskování. [5]	27
4.5	Závislost maskovacího prahu na vzdálenosti kmitočtů maskovacích signálů. [5]	28
4.6	Závislost kritické šířky pásma na jeho středním kmitočtu. [5]	28
4.7	Přiřazení kmitočtů kritickým pásmům. [5]	29
4.8	Tabulka kritických pásem. [5]	29
4.9	Vizualizace panningu. [13]	31
4.10	Ukázka phantom centera. [13]	31
5.1	Spektrum vyšších harmonických složek pro tón <i>a</i> violoncella.	38
5.2	Spektrum vyšších harmonických složek pro tón <i>h</i> trubky.	38
5.3	Kmitočtová odezva použitých sluchátek vztažená k 1 kHz.	39
6.1	Dotazník v prostředí Matlab.	42
8.1	Spektrum pro fagot <i>h</i> akordu <i>H</i> dur MSV.	52
8.2	Spektrum pro klavír <i>dis</i> <sup>1</sup> akordu <i>H</i> dur MSV.	52
8.3	Spektrum pro housle <i>fis</i> <sup>1</sup> akordu <i>H</i> dur MSV.	53
8.4	Spektrum pro trubku <i>h</i> akordu <i>H</i> dur VMS.	53
8.5	Spektrum pro kytaru <i>fis</i> <sup>1</sup> akordu <i>H</i> dur VMS.	54
8.6	Spektrum pro marimbu <i>dis</i> <sup>1</sup> akordu <i>H</i> dur VMS.	54
8.7	Spektrum pro cello a z klastru.	55
8.8	Spektrum pro anglický roh <i>h</i> z klastru.	55
8.9	Spektrum pro lesní roh <i>c</i> <sup>1</sup> z klastru.	56
8.10	Spektrum pro pozoun <i>d</i> <sup>1</sup> z klastru.	56
8.11	Spektrum pro klavír <i>e</i> <sup>1</sup> z klastru.	57
8.12	Spektrum pro fagot <i>f</i> <sup>1</sup> akordu <i>Fmi</i> <sup>-5</sup> .	58
8.13	Spektrum pro marimbu <i>as</i> <sup>1</sup> akordu <i>Fmi</i> <sup>-5</sup> .	58
8.14	Spektrum pro klarinet <i>ces</i> <sup>2</sup> akordu <i>Fmi</i> <sup>-5</sup> .	59
8.15	Spektrum pro sinus <i>g</i> <sup>1</sup> akordu <i>Gmi</i> <sup>-5</sup> .	59
8.16	Spektrum pro harfu <i>hes</i> <sup>1</sup> akordu <i>Gmi</i> <sup>-5</sup> .	60
8.17	Spektrum pro příčnou flétnu <i>des</i> <sup>2</sup> akordu <i>Gmi</i> <sup>-5</sup> .	60
8.18	Spektrum pro příčnou triangl <i>es</i> <sup>2</sup> akordu <i>Ami</i> <sup>-5</sup> .	61
8.19	Spektrum pro vibrafon <i>c</i> <sup>2</sup> akordu <i>Ami</i> <sup>-5</sup> .	61
8.20	Spektrum pro zvonkohru <i>a</i> <sup>1</sup> akordu <i>Ami</i> <sup>-5</sup> .	62

A.1	Spektrum pro pikolu $f^2$ akordu $Hmi^{-5}$ . . . . .	69
A.2	Spektrum pro okarinu $d^2$ akordu $Hmi^{-5}$ . . . . .	69
A.3	Spektrum pro celestu $h^1$ akordu $Hmi^{-5}$ . . . . .	70
A.4	Spektrum pro housle $a^1$ akordu $A7$ sus4. . . . .	70
A.5	Spektrum pro hoboje $d^2$ akordu $A7$ sus4. . . . .	71
A.6	Spektrum pro klarinet $e^2$ akordu $A7$ sus4. . . . .	71
A.7	Spektrum pro sinus $g^2$ akordu $A7$ sus4. . . . .	72
A.8	Spektrum pro housle $c^2$ akordu $C$ phryg v.7. . . . .	72
A.9	Spektrum pro hoboje $cis^2$ akordu $C$ phryg v.7. . . . .	73
A.10	Spektrum pro klarinet $g^2$ akordu $C$ phryg v.7. . . . .	73
A.11	Spektrum pro sinus $h^2$ akordu $C$ phryg v.7. . . . .	74

## Seznam tabulek

5.1	Ukázka vybírání akordů . . . . .	32
5.2	Přehled vybraných akordů a jejich intervaly . . . . .	33
5.3	Typy skupin . . . . .	33
5.4	Kombinace pro akustickou kytaru hrající akord $e$ moll. . . . .	33
5.5	Kombinace dvou akordů pro stejné nástroje. . . . .	34
5.6	Kombinace jednoho akordu s jinými nástroji. . . . .	34
5.7	Kombinace jednoho akordu s jinými nástroji. . . . .	34
5.8	Kombinace pro pětihlasý klastr. . . . .	35
5.9	Kombinace pro nástroje z kategorie <b>M</b> akordu $Fmi^{-5}$ . . . . .	35
5.10	Kombinace pro nástroje z kategorie <b>M</b> akordu $Gmi^{-5}$ . . . . .	35
5.11	Kombinace pro nástroje z kategorie <b>M</b> akordu $Ami^{-5}$ . . . . .	35
5.12	Kombinace pro nástroje z kategorie <b>M</b> akordu $Hmi^{-5}$ . . . . .	35
5.13	Pořadí jednotlivých akordů pouštěných posluchačům . . . . .	37

## Seznam výpisů

# Úvod

Tato práce se zabývá psychoakustickým vnímáním shodně instrumentovaných akordů (souzvuků) různě rozložených ve stereu, kdy v rámci akordu vždy každý jednotlivý tón hraje jiný nástroj. Také se zabývá neshodně instrumentovanými akordy různě rozloženými ve stereu. Tyto souzvuky byly zkoumány na 72 posluchačích, kteří akordy poslouchali a měli určovat nástroje ve vždy přehraném akordu. Poté měli podle určité hodnoticí škály určit jejich srozumitelnost a srozumitelnost akordů do mnou vytvořeného dotazníku.

Předpoklad výsledků je takový, že maskující účinek jednotlivých nástrojů mezi sebou bude nejmenší v případech, kdy na stereo ose je jeden nástroj 100% vlevo, druhý v nule a třetí 100% vpravo. Například tedy housle 100% vlevo, klavír uprostřed (0) a fagot 100% vpravo. Takto by nástroje měly být nejvíce srozumitelné a nejlépe rozeznatelné. Také předpokládám, že v případech, kdy jsou nástroje intervalově blízko sebe a každý z nich je z jiné kategorie produkce vyšších harmonických složek, měl by nástroj produkující více vyšších harmonických složek maskovat nástroj, který vyšších harmonických složek tvoří méně. Cílem je tedy podle výsledků tyto hypotézy potvrdit či vyvrátit. Obecně totiž nejsou dané žádné normy pro umísťování nástrojů ve stereo bázi (na stereo ose). Vychází se pouze ze známých pouček, jako například umísťovat nejhluběji hrající nástroje doprostřed stereo báze a ostatní výše hrající nástroje kolem nich.

Výsledky tohoto výzkumu by měly sloužit zejména pro skladatele, kteří by mohli zvolit pro různé harmonie různé nástroje podle produkce jejich vyšších harmonických složek, aby nástroje byly srozumitelné, a také by výsledky mohly pomoci inženýrům při mixáži hudby, kteří by se o tuto práci mohli opřít při rozložení nástrojů ve stereu, případně jejich ekvalizaci. Ovšem je třeba upozornit, že výsledky se vztahují pouze pro konkrétní akordy a nástroje použité v této práci a neměly by tedy být brány všeobecně.

Úvodní kapitola 1 popisuje vědní obor psychoakustiku, její historii, zaměření a cíle. Další kapitola 2 se zabývá barvou zvuku, podle které je každý člověk schopný rozpoznat určitý nástroj nebo zvuk. Ukazuje historii jejího zkoumání, čím je barva zvuku určena a i její matematickou analýzu. Následující kapitola 3 se věnuje popisu intervalů a akordů. Zde jsou především popsány vlastnosti intervalů a akordů použitých v této práci. Další kapitola 4 je o binaurálním slyšení, maskování a stereu. Popisuje poslech člověka oběma ušima, vlastnosti maskování spojené s maskováním binaurálním u člověka a také popisuje, co je stereo a jak ho využít. Následující kapitola 5 rozebírá průběh výzkumu od výběru nástrojů, vytvoření akordů, jejich rozdělení do určitých skupin a kombinací, přes výběr posluchačů a pilotní výzkum a první podkapitola kapitoly 6 popisuje skript naprogramovaný v prostředí Matlab,

který slouží k analýze vyšších harmonických složek. Druhá podkapitola je grafická ukázka dotazníku, jenž je také naprogramován v Matlabu. Popisuje přehrání akordů a zápis dat do tabulky v MS Excel. Kapitola 7 se zabývá vyhodnocením nasbíraných dat od posluchačů a dává je do souvislosti se spektry nástrojů a jejich rozložením ve stereu. Poslední kapitola 8 ukazuje spektra použitých nástrojů.

# 1 Psychoakustika

Jedním ze specifických vědních oborů, o jehož výzkumy a závěry se opírá tato bakalářská práce, je psychologická akustika. Častěji bývá tento vědní obor označován pojmem psychoakustika. Psychoakustika je jedním z celé řady podoborů exaktní vědy zvané psychofyzika. Seznámit se a pochopit závěry výzkumů a vědeckých bádání v oblasti psychofyziky a psychoakustiky, které nabyly na intenzitě především v 19. a 20. století mj. díky Gustavu Theodorovi Fechnerovi a Ernstu Heinrichu Weberovi, je stěžejním pro výzkum, kterým se zabývá tato bakalářská práce [1].

Psychofyziku jako první pojmenoval a dal jí základy právě německý lékař a psycholog Ernst Heinrich Weber. V 19. století v Německu vznikly základy psychofyziky, která kombinovala poznatky řady profesí a oborů jako je lékařství, filosofie, matematika, fyzika, ale i umění a estetika. Podstatou psychofyziky je definování vztahů mezi psychikou, myslí, subjektivním vnímáním na straně jedné a fyzikálními jevy, impulsy a ději v těle člověka na straně druhé. Toto téma dále rozvíjel filozof, psycholog a fyzik Gustav Theodor Fechner. Jako spoluautor díla „Elemente der Psychophysik“ společně s Weberem objevují, popisují a snaží se pomocí experimentů dokázat vztahy a souvislosti mezi skutečností, realitou a vnímáním této skutečnosti lidskými smysly a dopadem na duchovní stránku vnímání [1].

Weberovy a Fechnerovy výzkumy v oblasti psychofyziky hledaly souvislosti mezi intenzitou nebo kvantitou fyzikálních podnětů a jejich vyvolaným vnímáním, tzv. čistými smyslovými počítky. Tyto smyslové počítky mohly být vnímány kterýmkoliv ze smyslů, především sluchem a zrakem, ale i ostatními smysly. Počítky byly chápány jako nezávislá smyslová reakce na fyzikální podněty neovlivněná žádným vedlejším faktorem jako je zkušenost, myšlení nebo názor. Tyto myšlenky jsou dnes již překonané novými závěry moderní psychofyziky, která klasický výklad vjemů a počítků odmítá a tvrdí, že čisté neovlivněné počítky neexistují. Moderní psychofyzika prosazuje celostní chápání vjemů jako soubor všech vlivů působících v dané situaci na daný subjekt. Rozvinula se ve 40. až 50. letech 20. století v souvislosti s rozvojem teorie záznamu signálu a s novými přístupy k měření v psychologii. Významným představitelem byl americký experimentální psycholog Stanley Smith Stevens [1].

Podoborem psychofyziky je psychoakustika. Tento vědní obor se zabývá a zkoumá procesy v lidském těle, které vyvolá působení zvukových podnětů. Opírá se o znalosti z velké řady rozličných vědních disciplín jako je neurofyzilogie, teorie signálů, estetika, kybernetika, statistika a další. Opět tedy spojuje poznatky z odvětví lékařství, matematiky, fyziky a filosofie. Konkrétně např. řeší problematiku měření prahů slyšení osob, posuzování zvukové kvality hudebních nástrojů, posuzování rušivých účinků hluku v kabině automobilu, ale i třeba studium vzniku agresivity u osob dlouhodobě vystavených působení hluku. Pro tuto bakalářskou práci je důležitý po-

jem hudební psychoakustika také označovaný jako psychoakustika hudby. Tato věda studuje psychické reakce lidí na hudební signály, tedy signály, které jsou nositeli hudební informace. Význam slova „signál“ je spojen s časově proměnnou fyzikální veličinou nesoucí určitou konkrétní zvukovou informaci. Hudební signály lze dělit na přirozené a umělé. Přirozené jsou vytvořeny akustickými hudebními nástroji nebo lidským hlasem, umělé elektronickým obvodem. Hlavním cílem psychoakustiky je zjištění kvantitativních vztahů mezi zvukovými podněty a sluchovými vjemy člověka. Problematikou vztahů mezi zvukovými podněty a sluchovým vnímáním jednotlivců se zabývá tato práce nebo např. studium závislosti hlasitosti sinusového tónu na akustických parametrech jeho zvukové vlny [1].



## 2 Barva zvuku

Jedním z úkolů posluchačů v dotazníku bylo určení všech nástrojů, které hrají v právě přehrávaném akordu. Každý nástroj má svoji barvu. Proto je tato kapitola věnována barvě zvuku.

Obecná definice zvuku popisuje zvuk jako opakované mechanické zhušťování a zředování pružného prostředí, ve kterém se zvuk šíří. Typickým příkladem pružného prostředí je vzduch (vzduchové částice) nebo voda, ale i další prostředí jako dřevo, beton apod. Z fyzikálního pohledu je zvuk vlastně kmitáním tohoto prostředí. Přesně měřitelnými vlastnostmi zvuku jsou intenzita a frekvence (tzn. výška tónu ve slyšitelné oblasti), případně délka zvuku. Vedle měřitelné intenzity a frekvence stojí barva zvuku. Psychoakustická definice vymezuje barvu zvuku jako ten aspekt vnímání zvuku, který umožňuje posluchači posoudit odlišnost dvou zvuků při použití libovolného kritéria jiného než výška, hlasitost a doba trvání. Barva zvuku je jednou z nejdůležitějších charakteristik zvuku pro vnímání zvukové kvality například hudebního nástroje. Je i stěžejním parametrem při posuzování tzv. akustiky neboli akustické kvality prostorů určených k poslechu živé hudby či řeči, to znamená koncertních a divadelních sálů, poslucháren apod [1], [2].

Barva hudebního zvuku (zvaná také tímbr) charakterizuje celkový zvukový výraz hudebního nástroje nebo jednoho zvuku, který může tento nástroj vytvořit. Hodnocení barvy určitého hudebního zvuku bývá převážně spojováno s hudebním nástrojem, na který byl zvuk zahrán. Bývá posluchačem charakterizována pod zřejmým vlivem zvukem vyvolaných pocitů, momentálních vjemů a dojmů, které bývají spojené s předchozí hudební zkušeností posluchače [2]. Právě tento aspekt zkušenosti byl zohledněn v dotazníku, který je popsán v kapitole 5, a to požadavkem uvedení znalosti hry na hudební nástroje u každého posluchače.

Podle [1] je barva zvuku zřejmě nejsložitější, nejčastěji zkoumanou a nejméně probádanou veličinou ze všech základních sluchových vjemových veličin. Vědecké metody výzkumu charakteristik barvy zvuku jsou časově i ideově velmi náročné. Při tomto výzkumu se používá metoda sémantického diferenciálu, která bude popsána v kapitole 7. Ta se zabývá vyhodnocením dotazníků a nasbíraných dat od posluchačů.

Psychoakustika, jak již bylo v předchozí kapitole popsáno, definuje vnímání zvuku posluchačem, tedy přenášení a vyhodnocování zvuků v mozku posluchače. Oborem psychoakustiky se v 19. století zabýval německý fyzik Georg Simon Ohm. Ten v roce 1843 popsal psychoakustický zákon, který říká, že posluchač vnímá periodické sinusové kmitání pružného prostředí (částic vzduchu), tzn. určitý zvuk z určitého zdroje (hudební nástroj, hlas, tónový generátor) jako jednoduchý tón a každé jiné periodické kmitání vnímá jako odpovídající řadu k tomuto jednoduchému tónu.

U pravidelných zvuků ucho posluchače funguje jako frekvenční analyzátor, který vyhodnocuje frekvenci a amplitudu jednotlivých dílčích kmitů [3].

V roce 1823 vynalezl francouzský matematik a fyzik Jean Baptiste Joseph Fourier matematickou metodu harmonické analýzy, podle které je možno každé periodické (ale i neperiodické) kmitání rozložit v řadu harmonických složek (v této práci později označovaných jako vyšší harmonické složky) o frekvencích  $f, 2f, 3f, 4f$  atd. a jejich amplitudy. Vyšší harmonické složky jsou tedy celočíselnými násobky základní frekvence. Fourierova řada má několik tvarů: amplitudově-fázový, komplexní a goniometrický, který podle [4] vypadá takto:

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)],$$

kde  $k$  představuje celočíselné pořadové číslo vyšší harmonické složky,  $\omega$  představuje úhlovou frekvenci signálu, pro kterou platí vztah  $\omega = 2\pi f$ . Frekvence se dá mimo jiné vyjádřit vztahem  $f = \frac{1}{T}$ , kde  $T$  představuje periodu signálu, tedy za jak dlouho proběhne jeden cyklus signálu. Veličina  $t$  představuje čas, ve kterém se signál nachází. Jednotlivé koeficienty Fourierovy řady se vypočítají následovně:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) dt \quad a_k = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cos k\omega t dt \quad b_k = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \sin k\omega t dt.$$

Z Ohmových poznatků vyšel Hermann von Helmholtz, který v kombinaci s Fourierovou metodou harmonické analýzy, fyziologicko-anatomickými poznatky své doby a se základy propracování rezonančních jevů vytvořil první teorii slyšení [3].

Na základě detailního zkoumání nejrůznějších tónů Helmholtz definoval základní vztahy mezi typem spektra tónu a odpovídajícím vjemem jeho barvy:

- Jednoduché tóny sinusového charakteru znějí velmi měkce a příjemně, bez jakékoliv drsnosti, ne silně a v hlubokých polohách temně, tupě.
- Komplexní tóny tvořené řadou harmonických nižších pořadových čísel a přiměřené intenzity, zhruba do 6. vyšší harmonické, znějí plně a „hudebně“. V porovnání s jednoduchými tóny jsou zvukově bohatší a okázalejší. Absence harmonických vyšších pořadových čísel způsobuje jejich „libozvučnost“ a měkkost. Tyto tóny jsou typické např. pro klavír.
- Komplexní tóny tvořené lichými harmonickými, typické např. pro klarinet, znějí dutě a při velkém počtu harmonických i „huhňavě“ či nasálně.
- Pokud ve spektru komplexního tónu převažuje první harmonická, jeho barva se dá označit jako plná, naopak v případě převahy vyšších složek je tón „prázdný“ (spíše úzký či užší). Tento rozdíl je typický např. mezi klavírem a cembalem apod.

- U komplexních tónů s intenzivními harmonickými nad 6. nebo 7. vyšší harmonickou složkou je barva charakterizována jako ostrá a drsná, což souvisí především s konkrétní sestavou těchto vyšších harmonických složek [3].

Helmholtz se také zabýval vjemem barvy tónů s neharmonickými poměry ve spektru, které je příznačné např. pro zvony, membrány či desky a prokázal, že ucho je schopno analyzovat i tyto signály.

V roce 1863 stanovil Hermann von Helmholtz svoji relativní a absolutní teorii barvy zvuku. Podle něj je barva zvuku, resp. tónu, určena počtem a intenzitou jednotlivých vyšších harmonických složek. U tónů hudebních nástrojů jsou poměry intenzit jednotlivých vyšších harmonických složek spektra na absolutní výšce těchto složek nezávislé (relativní teorie). Například u vokálů je barva určena existencí jedné nebo dvou charakteristických vyšších harmonických složek, které jsou ve zvuku zdůrazněny. Jejich poloha je pevně spojena s jejich absolutní výškou (absolutní teorie). V praxi to znamená, že se stoupající výškou tónu hudebního nástroje se tvar spektra tohoto tónu nemění, zatímco u vokálů se zase nemění frekvenční poloha zdůrazněných složek - formantů [3]. Dále definoval tři fáze časové existence zvuků: nakmitávací pochody, výdrž tónu (zakmitaný stav) a dokmitávací pochody. Hudební interpretaci barvy zvuku ztotožnil se zakmitaným stavem zvuku, tj. se stabilním kmitočtovým spektrem [5].

Carl Stumpf jako první představitel psychoakustiky začal vnášet nové pohledy do akustiky definováním psychologické akustiky, která právě spojovala fyzikální a fyziologické aspekty hudby s psychologickými a estetickými. Zaměřil se na předefinování chápání základních vlastností zvuku výšky, hlasitosti a barvy. Jeho předchůdce Helmholtz viděl jasné a ekvivalentní spojení mezi fyzikálními podněty a vnímanou vlastností zvuku jako je frekvence – výška, intenzita – hlasitost a spektrum – barva. Stumpf kvalitativně povýšil výšku tónu na absolutní kvalitu tónu, hlasitosti tónu přiřazoval nízký význam založený na podstatě kvantity a barvě zvuku se nejprve nevěnoval vůbec. Později spojoval barvu jednoduchého tónu s její „vokality“ (hláskovou či vokální kvalitou), tedy s přiřazením sinusového tónu určité výšky danému vokálu. Tím objasnil otázku harmonických vztahů formantových oblastí, přesněji dominujících vyšších harmonických složek daného vokálu k jeho základnímu tónu. Jeho představa čistě harmonicky uspořádaných formantů byla označena jako Helmholtzova – Stumpfova nauka o harmonických formantech. Podle Stumpha není barva vokálu určena jen jedním harmonickým tónem pevné výšky, ale celou pevně stanovenou oblastí harmonických tónů – formantovou oblastí, ve které určitý harmonický tón vyniká. Podle počtu harmonických tónů Stumpf klasifikoval plnost a hustotu, ostrost a světlost, podle intenzity 1., 2. a 3. harmonické složky přiřazoval pojmy jako kulatý a plný, podle intenzity 1. a 3. vyšší harmonické složky přiřazoval pojmy dutý a prázdný, podle formantů podobnost s vokály [3]. Oproti Helmholtzovi prosa-

zval Stumpf názor, že vztah mezi fyzikálním podnětem a subjektivním důsledkem v procesu vnímání zvuku není jednoznačný a neměnný a nelze ho vysvětlit pouhým rozkladem na jednoduché prvky nebo děje. To zapříčinilo následný vývoj psychoakustiky na další desítky let, a tak Carl Stumpf rozdělil hudební akustiku na fyzikálně akustickou a hudebně psychologickou, která se v mezních případech úplně odlučovala od akustiky jako takové. Tato rozdělení se později spojila zpět až v druhé polovině 20. století [3].

Na základě dlouholetých analýz stanovil v roce 1929 německý fyzik Erich Schumann čtyři zákony barvy zvuku, kterými se snažil popřít Helmholtzovu relativní teorii. Znění zákonů dle [3] je následující:

#### **1. Zákon formantových oblastí**

Barva zvuku, resp. tónu, hudebního nástroje je dána nezávisle na výšce základní harmonické, pevnou (frekvenční) polohou formantových oblastí, které se vyznačují silnějšími vyššími harmonickými tóny.

#### **2. Zákon formantových intervalů**

Pro barvu zvuku resp. tónu hudebního nástroje je vedle frekvenční polohy formantových oblastí rozhodující též interval mezi těmito oblastmi, resp. mezi nejsilnějšími harmonickými tóny těchto oblastí. Velikost tohoto intervalu je charakteristická pro různé hudební nástroje.

#### **3. Zákon akustického posuvu**

Při stoupající dynamice tónu se přesouvá intenzitní maximum v dané formantové oblasti na harmonické složky vyšších pořadových čísel. Složky v horní části oblasti jsou obecně silnější než složky ve spodní části.

#### **4. Zákon akustického skoku**

U tónu se dvěma formantovými oblastmi přeskakuje při velkém zesílení tónu intenzitní maximum nalézající se při slabé dynamice v nižší formantové oblasti na harmonický tón nalézající se ve vyšší oblasti.

Mohlo by se zdát, že Schumannovy zákony snižují význam obou Helmholtzových teorií, ale ve skutečnosti je dobře propojují a spolu s nimi tvoří teoretické východisko praktického výkladu barvy tónu hudebních nástrojů [3].

## 3 Intervaly a akordy

Tato kapitola popisuje základy intervalů, akordů a jejich vlastností, které jsou použity v této práci. Celá kapitola je inspirována [6].

### 3.1 Intervaly

Interval v hudbě představuje výškovou vzdálenost mezi dvěma tóny, které mohou zaznívat buď po sobě, tehdy se jedná o interval melodický, nebo současně, v tom případě se jedná o interval harmonický. Jako příklad intervalu uvádím vzdálenost mezi tóny  $c-g$ , což je interval čistá kvinta, tóny  $c-e$  tvoří interval velkou tercii.

Intervaly se rozlišují podle jejich určitých vlastností na různé skupiny a druhy. Z pohledu stoupání či klesání tónů rozeznáváme intervaly svrchní a spodní. Svrchní (jinak zvané vzestupné či stoupající) intervaly jsou vyvozeny od daného tónu směrem nahoru, spodní (jinak zvané sestupné nebo klesající) jsou intervaly vyvozené od daného tónu směrem dolů. Se svrchními intervaly se setkáváme častěji. Jestliže není uvedeno jinak, bere se každý interval jako svrchní a jeho tóny vyjmenováváme v pořadí hlubší tón – vyšší tón (tedy hlubší tón jmenujeme jako první). U intervalů klesajících jmenujeme vždy jako první vyšší tón.

Název intervalu se skládá vždy ze dvou slov. Jedno slovo je číslovka, která udává velikost intervalu přibližně, druhé slovo je přídavné jméno, které určení intervalu upřesňuje. Pro označení intervalů se používají latinské číslovky a pro zkrácení v písmu čísla: prima (1), sekunda (2), tercie (3), kvarta (4), kvinta (5), sexta (6), septima (7), oktáva (8).

Intervaly se rozdělují na základní a odvozené. Základní intervaly se také dělí do dvou skupin na intervaly velké a čisté. Velkými intervaly jsou sekunda, tercie, sexta, septima. Čisté intervaly jsou prima, kvarta, kvinta, oktáva. Odvozené intervaly se vytváří ze základních intervalů rozšiřováním nebo zužováním po půltónech. Čisté intervaly pak mohou být zvětšené nebo zmenšené, velké mohou být zvětšené, malé nebo zmenšené a tyto všechny intervaly mohou být dvojnásobně zvětšené nebo dvojnásobně zmenšené. Často jsou v písmu uváděny zkrácené názvy intervalů, kdy se k číslům připojují zkratky příslušných přídavných jmen: m. = malý, č. = čistý, v. = velký, zv. = zvětšený, zm. = zmenšený, dvojjzv. = dvojnásobně zvětšený, dvojjzm. = dvojnásobně zmenšený. Například m.6 = malá sexta, č.8 = čistá oktáva, zm.4 = zmenšená kvarta, atd.

Dalším příkladem intervalů jsou jejich převraty. Převrat intervalu vzniká přeložením spodního tónu intervalu o oktávu výš, nebo svrchního tónu o oktávu níž. Z původního intervalu vzniká interval jiný, ale ne libovolný. Například pro interval  $c-e$  je jeho převratem interval  $e-c$ .

Jako poslední uvádím intervaly, které svým rozpětím přesahují oktávu. Chápeme je jako intervaly přenesené. Vznikají tak, že se spodní tón intervalu přeneseme o jednu nebo více oktáv dolů, nebo že vrchní tón intervalu přeneseme o jednu nebo více oktáv nahoru. Jsou to tedy intervaly rozšířené o jednu nebo více oktáv. Druh intervalu se touto úpravou nijak nemění, kvinta zůstává stále kvintou, tercie tercií, čisté intervaly zůstávají čistými, velké velkými, zmenšené zmenšenými apod. Název intervalu se tedy zachovává a pouze v případě potřeby se dodává, že jde o interval rozšířený o určitý počet oktáv, tedy jde o interval přenesený.

## 3.2 Akordy

Akordy jsou souzvuky nejméně tří tónů různé výšky. Dělí se do několika kategorií podle: počtu tónů na trojzvuky, čtyřzvuky, pětizvuky a vícezvuky, podle stavby akordu sestaveného z tercií nebo z kvart, podle zvukového působení na konsonance a disonance, navíc také na tvary základní a jejich obraty.

Nejčastější jsou akordy sestavené z tercií. Jsou pojmenovány podle intervalu mezi nejnižším a nejvyšším tónem. Dvě tercie tvoří kvintakordy (ze dvou tercií na sebe postavených vzniká kvinta), ze tří tercií vznikají septakordy (krajní tóny tvoří septimu). Jako u intervalů, tak i u akordů vznikají obraty přeložením spodního akordu o oktávu výš: kvintakord má dva obraty, septakord tři.

Jak bylo uvedeno, kvintakord se skládá ze dvou tercií. K jeho stavbě se používá velké a malé tercie a v důsledku toho vzniknou čtyři kvintakordy: durový, mollový, zvětšený a zmenšený. Durové a mollové kvintakordy se nazývají podle své primy: např. *H* dur kvintakord nebo *e* moll kvintakord. Značí se tak, jak je uvedeno, a to tak, že písmena durových akordů se píší velkým písmenem a mollových malým písmenem. Zvětšené a zmenšené kvintakordy se také nazývají podle jejich primy, například *c* zmenšený kvintakord, *d* zvětšený kvintakord; říká se též zmenšený kvintakord na tónu *c* (nebo od tónu *c*), podobně zvětšený kvintakord na (od) tónu *d* apod. Protože se tyto akordy nevyskytují tak často jako kvintakordy durové a mollové, jejich názvosloví není ustáleno. Já jsem v této práci použil čtyři kvintakordy zmenšené a pojmenoval je takto:  $Fmi^{-5}$ ,  $Gmi^{-5}$ ,  $Ami^{-5}$ ,  $Hmi^{-5}$ , viz 5.9,5.10,5.11,5.12.

Kvintakord má dva obraty – sextakord a kvartsextakord. První obrat vznikne přeložením primy kvintakordu o oktávu výš. Z důvodu, že jeho krajní tóny tvoří sextu, jmenuje se sextakord. Druhý obrat se vytvoří přeložením spodního tónu sextakordu o oktávu výš. Jeho primou je původní kvinta, akord se skládá z kvarty a sexty a z nich se vytvoří i jeho název: kvartsextakord.

Septakordy vznikají připojením další tercie ke kvintakordům. Skládají se ze tří tercií, jeho krajní tóny tvoří septimu. Názvy septakordů jsou závislé na tom, jaký kvintakord tvoří první tři tóny septakordů (jeho prima, tercie a kvinta) a jaká je jeho

septima: velká, malá nebo zmenšená. Názvy septakordů jsou složeny ze dvou slov: první slovo označuje kvintakord, druhé septimu, přičemž pro označení kvintakordů se používá zjednodušených názvů tvrdě, měkce, zmenšeně a zvětšeně...(malý nebo velký septakord apod.). Já jsem použil dva septakordy a označil je takto: A7 sus4, C phryg v.7. První akord je tvrdě malý septakord a druhý je tvrdě velký septakord.

## 4 Binaurální slyšení, maskování, stereo

Tato kapitola popisuje binaurální slyšení (poslech oběma ušima), protože posluchači tohoto jevu využívali při poslechu zkoumaných vzorků jednotlivých akordů. Dále je zde popsána teorie maskování, která vysvětluje, jak se jednotlivé zvuky (v mém případě tedy nástroje v akordech) maskují a jak maskování vzniká v lidském mozku. Poslední podkapitola popisuje stereo bázi, která se využívá právě pro nižší efekt maskování, např. při mixu hudby, a tím pádem vznikne vyšší srozumitelnost jednotlivých nástrojů.

### 4.1 Binaurální slyšení

Z fyzikálního hlediska za zvuk považujeme kmitání pružného prostředí (v obvyklých podmínkách se jedná o kmitání částic vzduchu). Zvuk vstupuje do zevního ucha (boltec, zvukovod), pokračuje středním uchem (bubínek, řetězec kůstek, dutina bubínková, středoušní svaly, Eustachova trubice) až do ucha vnitřního (kostěný a blanitý labyrint hlemýžďe). Tam se transformuje na bioelektrický impuls, který ho sluchovou nervovou dráhou přivádí do sluchového centra ve spánkovém laloku mozku. Toto centrum je propojeno s dalšími důležitými centrálními oblastmi, které se podílejí na zpracování akustického signálu [7],[8].

Vzhledem k tomu, že jsou uši umístěny na opačných stranách hlavy a vzdálenost mezi nimi je dána velikostí hlavy, je v každém z nich po příjmu akustického signálu tento signál trochu jiný. Tento rozdíl se označuje jako interaurální (meziušní) a dělí se na tři typy: časový, fázový a intenzitní [7].

U binaurálního slyšení se rozlišuje případ poslechu stejného signálu v obou uších (diotický poslech) nebo poslech odlišného signálu v obou uších (dichotický poslech). Při dichotickém poslechu, hlavně na sluchátka, se navozují umělé poslechové situace při studiu obecných binaurálních vlastností sluchu i sluchových klamů a představ [3],[5].

Tím, že lidé mají dvě uši, umožňuje jim to využívat sluchu pro vjem prostorovosti a lokalizace zdroje zvuku. Kromě toho má mozek v kombinaci s ušima také schopnost binaurální sumace a maskování. Při binaurální sumaci platí, že při poslechu oběma ušima dochází k centrálnímu zesílení slyšeného zvuku, čímž stoupne jeho hlasitost. Jednoduše se zdvojí nervové podráždění, které se z obou uší počítá. Za situace, že má každé ucho jiný práh slyšitelnosti, je binaurální práh daný prahem citlivějšího ucha. Jestliže mají uši stejný práh, při diotickém poslechu se binaurální práh zlepšuje o 3 dB oproti monaurálnímu poslechu (poslechu jedním uchem). Na hladině nejpráhovější hlasitosti (MCL) se rozdíl oproti monaurálnímu poslechu zlepšuje dokonce o 6 dB. Na hladině 90 dB<sub>SPL</sub> je to až 10 dB [7].



## 4.2 Maskování

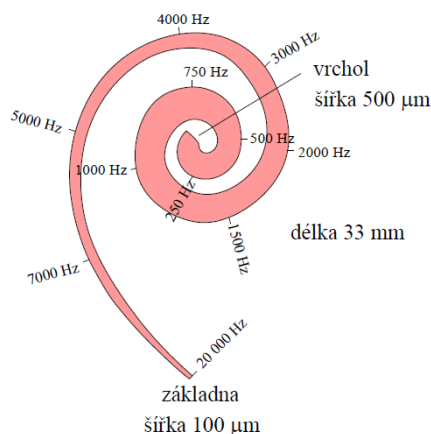
Mezi základní psychoakustické jevy patří maskování. Uplatňuje se především při poslechu řeči i hudby. Omezuje zvukovou informaci co do rozsahu ještě předtím, než projde senzorickou a nervovou cestou do primární sluchové kůry. Musím zdůraznit, že vliv na informaci je pozitivní, přesněji řečeno užitečný. Je to jev velmi častý a např. sluchový vjem zvuku orchestru bez vlivu maskování neexistuje [3].

Při vstupu dvou zvuků do sluchového orgánu současně může nastat situace, že jeden ze zvuků zeslabí, nebo zcela eliminuje vjem zvuku druhého. V takovém případě mluvíme o zvuku maskujícím a zvuku maskovaném. Celý děj se nazývá maskování [5]. Maskování je důsledkem funkce vnitřního ucha na straně senzorické a rozdílu kmitočtů a jejich intenzity na straně zdroje. Vše se děje při přeměně mechanicko-akustické energie zvuku na bioelektrický potenciál a nervový vzruch ve vnitřním uchu [8].

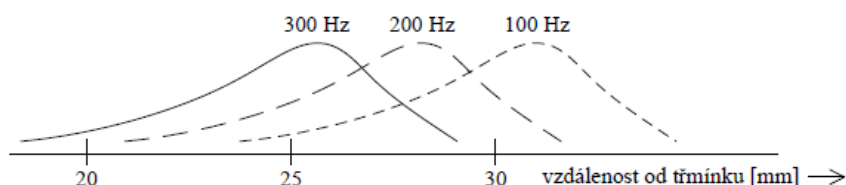
Vnitřní ucho je uloženo v labyrintu pyramidy spánkové kosti, která tvoří jakési ochranné pouzdro. Sluchová část vnitřního ucha, která nás zajímá, je tvořena hlemýžděm [9]. Kmitající řetězec kůstek přenáší akustickou energii přes ploténku třmínku do vestibula (část labyrintu vnitřního ucha obsahující ústrojí rovnováhy), ve kterém dochází k rozkmitání perilymfy (tekutina vyplňující prostor mezi blanitým a kostěným labyrintem). Kmitání perilymfy se přenáší na bazilární membránu vnitřního ucha, která se rozkmitá od základny směrem k vrcholu hlemýždě. Na bazilární membráně, tvořené z napříč napjatých vazivových vláken, je uloženo Cortiho (sluchové) ústrojí. Základem tohoto ústrojí jsou smyslové buňky, tzv. buňky vláskové, které jsou anatomicky i funkčně děleny na zevní a vnitřní. Zevní vláskové buňky jsou seřazeny převážně ve třech řadách, zatímco vnitřní vláskové buňky pouze v řadě jedné [10]. Vlázky zevních vláskových buněk (stereocilie) jsou v kontaktu s tektonální membránou, která kryje Cortiho orgán svrchu. Pohybem Cortiho orgánu vzhledem k tektonální membráně dochází k ohýbání vlásků, přičemž se otvírají iontové kanálky [11]. Toky draslíkových iontů vedou ke vzniku elektrického potenciálu [8]. Hluboké tóny vyvolají kmitání vrcholové části bazilární membrány, vysoké tóny zase u základny hlemýždě. Ve skutečnosti však kmitání třmínku vyvolává kmitání bazilární membrány ve větší délce, ale toto kmitání dosahuje maxima v určitém bodě podle obrázku 4.1 .

Na obrázku 4.2 je znázorněna obálka amplitudy kmitání bazilární membrány pro různé kmitočty signálu. Pro lepší pochopení je bazilární membrána nakreslena jako rozvinutá. Osa x představuje vzdálenost od třmínku v milimetrech a osa y amplitudu kmitání. Je vidět, že dojde k podráždění smyslových buněk v širším úseku bazilární membrány a mozek vyhodnotí kmitočet tónu podle místa největšího podráždění.

Jestliže v této kapitole mluvíme o maskování, je vhodné zdůraznit, že pokud



Obr. 4.1: Pozice maxima kmitání bazilární membrány v závislosti na kmitočtu. [5]



Obr. 4.2: Obálka kmitání bazilární membrány pro různé kmitočty a stejnou intenzitu signálu. [5]

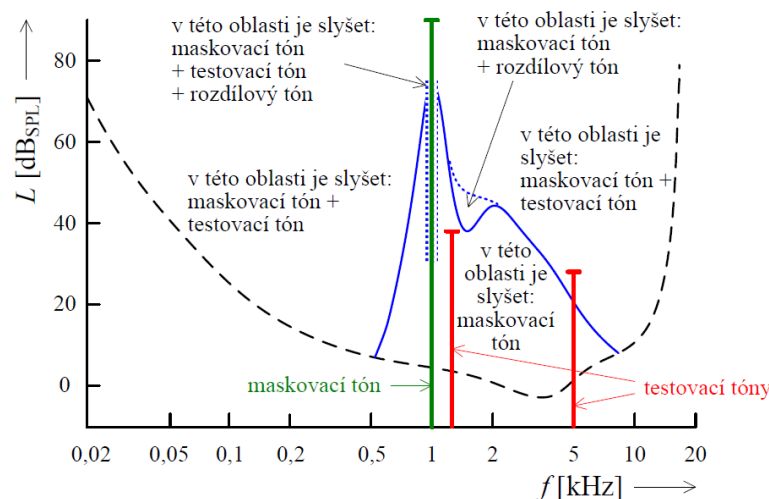
jsou smyslové buňky ve stavu podráždění, nejsou schopny po určitou dobu přijmout další podráždění. Proto zvuk, který vzruchy zaplní příslušnou oblast bazilární membrány, zabrání slyšení jiného zvuku slabšího, který dráždí tutéž zónu. Maskují se tedy jen ty zvuky, které dráždí stejná místa na bazilární membráně jako maskující zvuk a u kterých amplituda kmitání bazilární membrány, které způsobí, je menší než velikost jejího kmitání způsobeného v daném místě maskujícím zvukem [5].

Maskování se dá měřit, a to s pomocí posunu sluchového prahu maskovaného zvuku. Hovoříme o dvou typech maskování – kmitočtovém (simultaneous masking) a dočasném (temporal masking).

#### 4.2.1 Kmitočtové maskování

U kmitočtového maskování byly změřeny maskovací prahy pro harmonické signály (čisté tóny), širokopásmový šum (zejména bílý), úzkopásmový šum, vysokofrekvenční a nízkofrekvenční šum a komplexní zvukové signály [5]. Pro harmonický signál platí, že nejvyšší maskovací účinek je na jeho vlastní frekvenci. Vlastní frekvencí je myšlena frekvence vlastních kmitů, tedy takových kmitů, kde na oscilátor nepůsobí budící

síla [12]. Maskující tón nebo šum způsobuje maskování souměrně na obě strany frekvenční osy od vlastní frekvence maskujícího zvuku. Tato symetrie platí pouze pro nízké hladiny tohoto zvuku (40 – 50 dB). Při zvětšování intenzity jsou vyšší tóny než maskující maskovány více, viz následující obrázek 4.3 [3, 5].



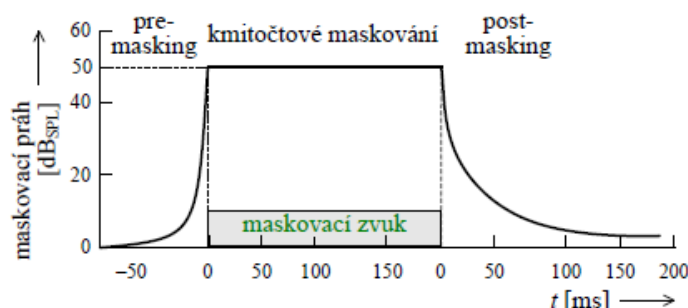
Obr. 4.3: Křivka maskování harmonického signálu. [5]

Největší maskování nenastává při souhlasu, resp. těsné blízkosti frekvencí, protože v takovém případě identifikaci maskovaného tónu ulehčují vznikající rázy s maskujícím tónem. V praxi se pro frekvenci 1 kHz udává nutný odstup tónu maskovaného od maskujícího pro případ spolehlivého maskování v unisonu nejméně 20 dB. Intenzivnější maskování vyšších frekvencí má velký vliv na srozumitelnost reproduované řeči a na techniku ozvučování vůbec. Vysoké hladiny základního tónu mohou v případě řeči maskovat také formantové oblasti důležité pro její srozumitelnost [3].

## 4.2.2 Dočasné maskování

Časové maskování je maskování krátkého zvukového impulzu před zazněním („pre-masking“) nebo po doznění („post-masking“) maskujícího signálu. Pro praxi platí, že se zde častěji projevuje „post-maskování“, které je silně závislé na době trvání a intenzitě maskujícího signálu. Příkladem časového maskování v hudbě je např. prodloužení subjektivní délky krátkých tónů nebo „neslyšitelnost“ střihu zvukového záznamu před intenzivním zvukem. Pre-masking a post-masking se projevuje jako časově závislé snížení hladiny maskovacího prahu kmitočtového (současného) maskování. Následující obrázek znázorňuje situaci, kdy v čase 0 ms je sluchem rozpoznán začátek maskovacího tónu a v čase 200 ms je rozpoznán jeho konec; maskovací práh na kmitočtu maskovaného tónu je během současného znění obou tónů roven

50 dB<sub>SPL</sub>. Křivka pre-masking a post-masking znázorňuje změnu této hladiny před a po zaznění maskovacího zvuku. Z pohledu fyziologie sluchu se post-masking dá vysvětlit jako doba regenerace podrážděných smyslových buněk a pre-masking jako rychlost zpracování [3, 5].



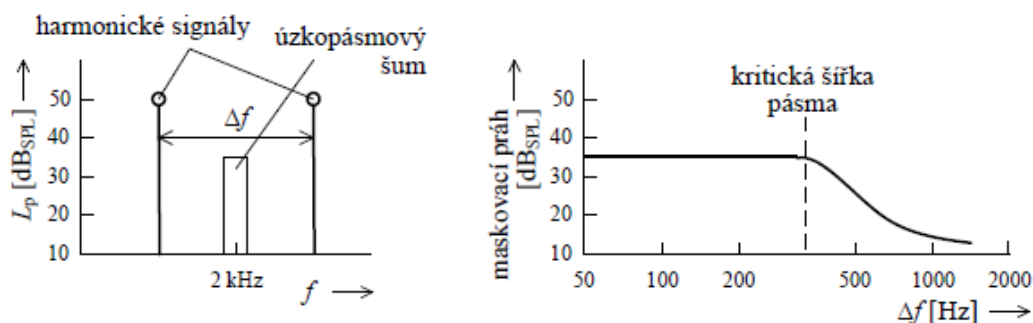
Obr. 4.4: Křivka dočasného maskování.[5]

### 4.2.3 Kritická pásma

Podle [5] se kritické pásmo definuje tak, že při maskování širokopásmovým šumem se uplatňuje jen ta část spektra šumu, která leží v okolí maskovaného šumu. Také se předpokládá, že maskování nastane, jestliže výkon čistého tónu a části šumu, která se podílí na maskování, jsou stejné.

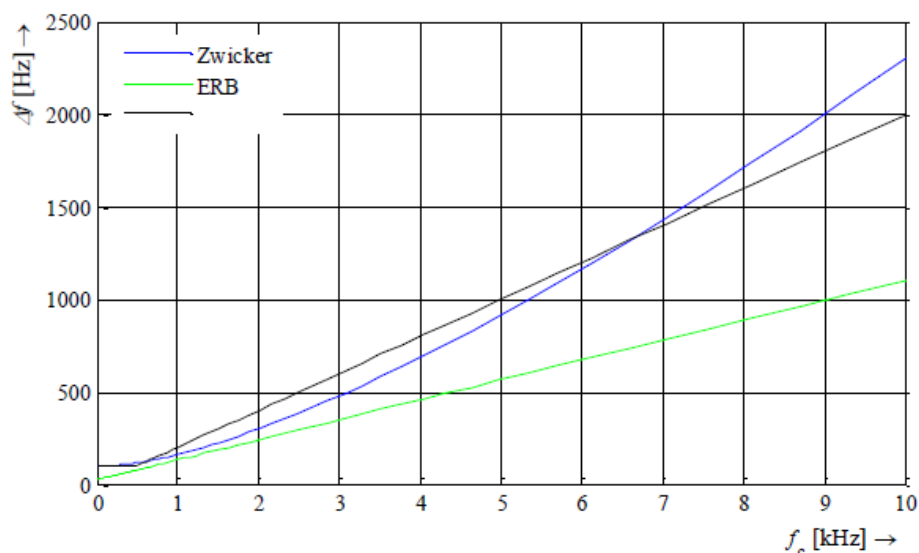
Šířka takto definovaných kmitočtových pásem se rovná šířce stejné produkce akustického výkonu šumu a čistého tónu, který je zrovna maskován. Při měření maskovacího prahu úzkopásmového šumu maskovaného dvěma harmonickými signály, jejichž kmitočty jsou symetrické podle středního kmitočtu (střední kmitočet je kmitočet, na kterém modulová kmitočtová charakteristika nabývá svého maxima) úzkopásmového šumu se zjistilo, že závislost maskovacího prahu úzkopásmového šumu na vzdálenosti kmitočtů maskovacích signálů je do určité hodnoty konstantní a poté začíná klesat, viz obrázek 4.5. Stejná závislost platí pro opačný případ, tedy když je harmonický signál maskován dvěma úzkopásmovými šumy, jejichž střední kmitočty jsou symetrické vůči kmitočtu harmonického signálu. Mezní hodnota vzdálenosti maskovacích zvuků, do které je maskovací práh neměnný, odpovídá právě šířce kritického pásma. Ta je závislá na dolním kmitočtu tohoto pásma. Také se předpokládá, že šířka kritického pásma odpovídá konstantní vzdálenosti na baziální membráně [3],[5].

V literatuře [5] je uvedeno, že závislost šířky kritického pásma  $\Delta f$  je na jeho středním kmitočtu  $f_C$  do 500 Hz konstantní v šířkách 100 Hz a poté téměř lineárně roste se strmostí  $0,2f$ . Jiní autoři však uvádí trochu jiné výsledky, hlavně pro kmitočty pod 500 Hz. Z toho důvodu se zavedla tzv. ekvivalentní šířka kritického



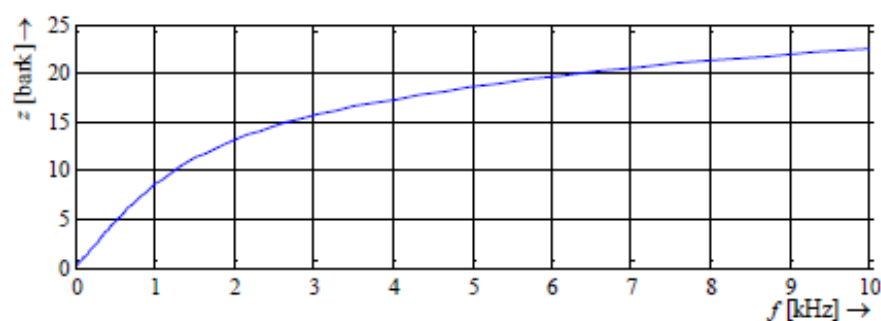
Obr. 4.5: Závislost maskovacího prahu na vzdálenosti kmitočtů maskovacích signálů.[5]

pásma (v angličtině Equivalent rectangular Bandwidth, ERB, Moore & Glasberg) [5]. Jejich porovnání je ukázáno na obrázku 4.6.



Obr. 4.6: Závislost kritické šířky pásma na jeho středním kmitočtu.[5]

Za předpokladu, že šířka kritického pásma odpovídá konstantní vzdálenosti na bazilární membráně, byla zavedena jednotková délka bazilární vzdálenosti  $z$ , která má jednotku bark podle německého fyzika Heinricha G. Barkhausena. Pojmem *critical band rate* se označuje funkce, která přiřazuje kmitočet signálu k poloze, na jejímž místě na bazilární membráně dojde k maximálnímu rozkmitu, viz obrázek 4.7. V rozsahu slyšitelných kmitočtů je 24 kritických pásem a číslo kritického pásma je závislé na jeho dolním kmitočtu, podle čehož se udává tzv. barková stupnice, viz obrázek 4.8. Mapování kmitočtu na polohu na bazilární membráně, kde dojde k maximálnímu rozkmitu, má značnou výhodu – maskovací křivky transformované do barkové stupnice mají jednodušší tvar a jsou snadněji aproximovatelné [5].



Obr. 4.7: Přiřazení kmitočtů kritickým pásmům. [5]

barková stupnice [bark]	dolní mezní kmitočet pásma [Hz]	horní mezní kmitočet pásma [Hz]	střední kmitočet pásma [Hz]	šířka pásma [Hz]
1	0	100	50	100
2	100	200	150	100
3	200	300	250	100
4	300	400	350	100
5	400	510	450	110
6	510	630	570	120
7	630	770	700	140
8	770	920	840	150
9	920	1080	1000	160
10	1080	1270	1170	190
11	1270	1480	1370	210
12	1480	1720	1600	240
13	1720	2000	1850	280
14	2000	2320	2150	320
15	2320	2700	2500	380
16	2700	3150	2900	450
17	3150	3700	3400	550
18	3700	4400	4000	700
19	4400	5300	4800	900
20	5300	6400	5800	1100
21	6400	7700	7000	1300
22	7700	9500	8500	1800
23	9500	12000	10500	2500
24	12000	15500	13500	3500

Obr. 4.8: Tabulka kritických pásem. [5]

#### 4.2.4 Binaurální maskování

Předchozí části 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 této podkapitoly popisovaly maskování monaurální. Binaurální maskování má oproti monaurálnímu jisté odlišnosti. Pokud se do obou uší přivede shodný maskovací signál, psychoakustickým experimentem se dá zjistit jeho maskovací křivka jako u monaurálního poslechu. Jestliže se ale do uší přivede stejný, avšak nekoherentní signál (např. šumový signál z různých generátorů), dojde ke snížení maskovacího prahu. Pokud posloucháme např. harmonický signál na pozadí šumu, kdy okamžitý fázový rozdíl šumového signálu mezi oběma ušima je  $180^\circ$ ,

bude harmonický signál slyšet i při nižších hladinách akustického tlaku než při monaurálním maskování. Podobného efektu se dá dosáhnout tak, že se do jednoho ucha přivede šum a užitečný signál, např. řeč, v intenzitním poměru tak, aby došlo k maskování. Pak se přivede stejný maskovací šum do druhého ucha, a tak dojde k posunu fiktivního zdroje šumu po interaurální ose doprostřed. Řeč, která bude stále slyšet z jednoho ucha, se stane srozumitelnou. Přivede-li se však řeč i do druhého ucha, znovu dojde k jejímu maskování [3, 7].

Rozdíl úrovní maskovacího prahu při monaurálním a binaurálním poslechu se říká Binaural Masking Level Differences. Na nižších kmitočtech je tento rozdíl úrovní výraznější (kolem 15 dB v oblasti 200 Hz), směrem k vyšším kmitočtům klesá (2 až 3 dB v oblasti 4 kHz). Tento jev bývá označován jako cocktail party efekt, protože je typický pro rozhovor v hlučném prostředí – pootočením hlavy posluchače dojde k porušení koherence hluku pozadí v obou uších a řeč se stane srozumitelnější. Posun maskovacího prahu tedy nastává vždy při fázových posuvech dvou zdrojů zvuku mezi oběma ušima [3],[5].

Dalším vysvětlením binaurálního maskování je existence buněk na sluchové dráze ve středním mozku, které reagují na rozdíl mezi ušima, z nichž některé reagují na předstih signálu zprava a jiné na předstih signálu zleva. Dále různě reagují na velikost předstihu a tím snižují maskování šumem, který je v obou uších ve stejné fázi [3].

## 4.3 Stereo

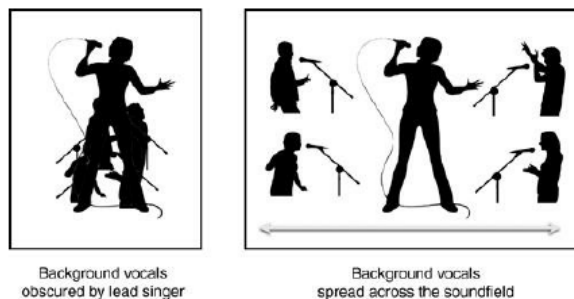
Stereo systém (což jsou dva oddělené zvukové kanály každý pro jeden reproduktor) vyjadřuje zvuk prostorově. Pomocí tzv. panningu si můžeme vybrat, kde v tomto prostoru umístíme zvolenou stopu (např. nástroj).

Ve skutečnosti se pomocí panningu dá ale docílit mnohem více. Např. vytvoření napětí přidáním „hybnosti“ nahrávky a přidáním jasnosti nástroji odkloněním ho ze společného místa jiných nástrojů, se kterými by se mohl „přebíjet“. Správný panning jednotlivých stop také dokáže nahrávku udělat pocitově větší, širší, nebo hlubší, někdy vše dohromady [13].

### 4.3.1 Stereo obraz

*„Představte si, že se díváte na westernový film. Děj se odehrává v arizonské poušti a přesně uprostřed obrazovky sedí kovboj na koni. Řekněme, že na něj začne útočit šest indiánů, ale nevidíme je, protože na obrazovce je kovboj přímo před nimi, viz 4.9. Jestliže je nevidíme, jejich role jakožto budovatelů napětí je velice omezená. Nebylo by lepší, pokud by režisér postavil indiány např. doleva tak, abychom na indiány viděli? Nebo kdyby je dokonce rozprostřel po celé obrazovce, aby útok vypadal*

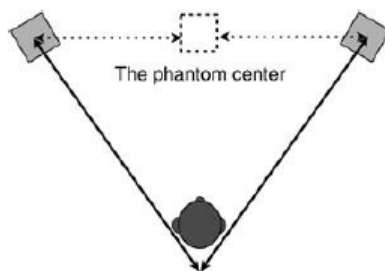
*větší a více zastrašující ? To je to, co dělá zvukový inženýr v rámci panningu. Dá mu to (zvukovému inženýrovi i režisérovi) možnost posunout vokály v pozadí (indiany) mimo hlavní vokál (kovboje), takže můžeme slyšet (vidět) každý (každého) více zřetelně“ [13].*



Obr. 4.9: Vizualizace panningu. [13]

### 4.3.2 The Phantom Center

Stereo, které v roce 1931 vynalezl Alan Blumlein v EMI Records, způsobuje fenomén známý jako phantom center. Phantom center znamená, že dva reproduktory dohromady způsobují představu imaginárního reproduktoru uprostřed mezi nimi, viz obrázek 4.10. Tato představa se někdy může posunout, pokud se vyvážení hudby pohybuje ze strany na stranu, což pro posluchače bývá znepokojující, zvláště, jestliže jsou reproduktory daleko od sebe [13]. Ose mezi oběma reproduktory se říká ste-



Obr. 4.10: Ukázka phantom centera. [13]

reo osa. Na této ose jsem také různě rozprostřel jednotlivé nástroje v akordech. Tato rozprostření a akordy jsou ukázány v tabulce 5.13, kde každé číslo ve sloupci stereo rozložení představuje, na kolik od středu osy je nástroj umístěn. Stereo osa nemá obecně daná pásma, takže mnou zvolená čísla jsou čistě přirozeným výběrem: k jedné třetině od nuly (35), do poloviny od nuly (50), do tří čtvrtin (75) od nuly a úplně na kraj (100). Písmeno L značí umístění nástroje vlevo od středu, písmeno R vpravo.



## 5 Průběh výzkumu

### 5.1 Základ výzkumu

Základem výzkumu bylo nalezení informací o různých nástrojích, vytvoření akordů, rozdělení jednotlivých hlasů nástrojů do akordů, tyto akordy rozdělit do skupin podle určitých kritérií a tóny nástrojů v rámci akordů různě rozprostřít na stereo ose. Jednotlivé popisy jsou následující.

#### 5.1.1 Výběr nástrojů

V rámci daného akordu hrál vždy jiný tón jiný nástroj. Protože jsem z [14, 15] předem věděl, že různé nástroje produkují různé množství vyšších harmonických složek, vytvořil jsem si tabulku, která pro představu vypadala takto:

Tab. 5.1: Příklad mnou vybraných nástrojů s jejich rozsahy, tvorbou vyšších harmonických složek a počty vyšších harmonických složek.

Nástroje	Rozsah	Harmonické	Počet vyšších harmonických složek
Housle	$g-g^4$	liché i sudé	20
Hoboj	$h-f^3$	liché sudé	12
Klarinet	$e-f^3$	převažující liché	6

Tabulka byla samozřejmě mnohem větší, protože nástrojů jsem si vypsal co největší množství. Informace o rozsazích, tvorbě harmonických a počtu vyšších harmonických jsem sepsal také z [14, 15]. Vybrané nástroje byly tyto: fagot, klavír, housle, trubka, kytara, hoboj, klarinet, violoncello, anglický roh, lesní roh, pozoun, harfa, příčná flétna, zvonkohra, vibrafon, triangel, celesta, pikola, marimba, vibrafon<sup>1</sup>. Jako zástupce umělých zvuků jsem použil sinus ze zvukové banky elektrického pianu Yamaha DGX-230. Ze stejné banky jsem také použil okarinu.

#### 5.1.2 Volba akordů

Dalším krokem byla volba akordů. S panem vedoucím práce jsme se domluvili, že použijí akordy obsahující maximálně pět tónů. Vybrané intervaly byly tyto: malá sekunda, velká sekunda, malá tercie, velká tercie, čistá kvarta, zvětšená kvarta, čistá kvinta, malá septima a velká septima. Tabulka 5.2 ukazuje, jaké akordy převzaté z [16] jsem použil a z jakých intervalů se skládají:

<sup>1</sup>Marimba a vibrafon mají ve skutečnosti neharmonické spektrum, tedy jejich vyšší harmonické složky nejsou celistvými násobky základního tónu, viz 7.2.

Tab. 5.2: Přehled vybraných akordů a jejich intervaly.

Název akordu	Intervaly
<i>H</i> dur	velká tercie, čistá kvinta
<i>A7</i> sus4	kvarta, kvinta, malá septima
<i>C</i> phryg v.7	malá sekunda, čistá kvinta, velká septima
<i>F</i> mi <sup>-5</sup> , <i>G</i> mi <sup>-5</sup> , <i>A</i> mi <sup>-5</sup> , <i>H</i> mi <sup>-5</sup>	malá tercie, zmenšená kvinta
klastr <i>a h c<sup>1</sup> d<sup>1</sup> e<sup>1</sup></i>	velká sekunda, malá tercie, čistá kvarta, čistá kvinta
<i>e</i> moll	malá tercie, čistá kvinta

### 5.1.3 Rozdělení akordů

Dále jsem si určil tři kategorie pro vyjmenované nástroje podle toho, jaký počet vyšších harmonických složek produkují. Podle [17] nástroje dělíme na: měkké 1 – 8, středně plné 9 – 16, plné 17 a více. Já jsem si jednotlivé kategorie označil jako **M** (měkké), **S** (středně plné), **V** (plné). Abych v této práci nezkoumal pouze jediný akord složený z různých barev nástrojů, rozhodl jsem se vytvořit tabulku 5.3 obsahující čtyři typy skupin, podle kterých jsem poté udělal různé kombinace akordů:

Tab. 5.3: Typy skupin.

Číslo skupiny	Typ skupiny
1	Stejná instrumentace – stejný akord
2	Stejná instrumentace – jiný akord
3	Jiná instrumentace – stejný akord
4	Jiná instrumentace – jiný akord

Zkombinováním předchozích tří tabulek jsem došel k následujícím kombinacím:

#### První kombinace:

- Kombinace pro akord *e* moll hraný na akustickou kytaru (skupina 1).

Tab. 5.4: Čtyři kombinace pro akustickou kytaru a akord *e* moll.

<b>1. verze akordu <i>e</i> moll</b>	<i>e</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
<b>2. verze akordu <i>e</i> moll</b>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>e</i> <sup>1</sup>
<b>3. verze akordu <i>e</i> moll</b>	<i>h</i>	<i>e</i> <sup>1</sup>	<i>g</i> <sup>1</sup>
<b>4. verze akordu <i>e</i> moll</b>	<i>E</i>	<i>g</i>	<i>h</i> <sup>1</sup>

V tomto případě jsem zkoumal, jak se projeví různé uspořádání tónů (úzká a široká harmonie včetně převratů) tvořících akord *e* moll. Všechny tóny byly na stereo ose umístěny doprostřed (0), viz 5.13. Zde tedy nešlo výhradně o účinky maskování.

**Druhá kombinace:**

- Kombinace stejných nástrojů hrajících jiné akordy (skupina 2).

Tab. 5.5: Kombinace dvou akordů pro stejné nástroje.

Název akordu	Tóny akordu	Kat. vyš. harm.	Nástroje z akordu
A7 sus4	$a^1 d^2 e^2 g^2$	V S S M	housle, hoboj, klarinet, sinus
C phryg v.7	$c^2 cis^2 g^2 h^2$	V S S M	housle, hoboj, klarinet, sinus

V tomto případě jsem zkoumal, jak se u akordu A7 sus4 projeví maskovací účinek houslí vůči ostatním nástrojům, které tvoří méně vyšších harmonických složek. Také jsem chtěl vidět, jak se projeví maskovací účinek na tónech  $d^2$  pro hoboj a  $e^2$  pro klarinet, které jsou ze stejné kategorie (**S**) pro tvoření vyšších harmonických složek. U akordu C phryg v.7 jsem zkoumal, jak se projeví maskovací účinek houslí (kategorie **V**) hrajících tón  $c^2$  oproti hoboji (kategorie **S**) hrajícího tón  $cis^2$ . Pro oba akordy mě také zajímalo, ve kterých případech stereo rozložení posluchači poznají hrající sinus.

**Třetí kombinace:**

- Kombinace pro akord H dur s jinými nástroji (skupina 3).

Tab. 5.6: Kombinace č. 3.1 pro jiné nástroje a akord H dur.

Název tónu	Kategorie vyšších harmonických	Hrající nástroj
$h$	M	Fagot
$dis^1$	S	Klavír
$fis^1$	V	Housle

Tab. 5.7: Kombinace č. 3.2 pro jiné nástroje a akord H dur.

Název tónu	Kategorie vyšších harmonických	Hrající nástroj
$h$	V	Trubka
$dis^1$	M	Marimba
$fis^1$	S	Kytara

U této kombinace jsem zkoumal maskovací účinek především nástrojů z kategorie **V** (tedy housle a trubka) vůči nástrojům z kategorií **S** a **M**.

**Čtvrtá kombinace:**

- Kombinace pro pětihlasý klastr<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>Klastr je shluk tónů, které jsou intervalově co nejblíže sobě

Tab. 5.8: Kombinace pro pětihlasý klastr (skupina 1).

Název tónu	$a$	$h$	$c^1$	$d^1$	$e^1$
Nástroj	violoncello	anglický roh	lesní roh	pozoun	klavír

U této kombinace šlo vyloženě o projev maskovacího účinku při různém rozložení tónů na stereo ose. Také jsem chtěl vidět, jak se projeví různý počet vyšších harmonických složek pro různé nástroje z kategorie **S** a jaký vliv budou mít tak malé intervaly mezi jednotlivými tóny.

**Pátá kombinace:**

- Kombinace pro nástroje z kategorie **M**.

Tab. 5.9: Kombinace 5.1 pro nástroje z kategorie **M** akordu  $Fmi^{-5}$  (skupina 4).

Tóny z akordu	$f^1$	$as^1$	$ces^2$
Nástroje	fagot	marimba	klarinet

Tab. 5.10: Kombinace 5.2 pro nástroje z kategorie **M** akordu  $Gmi^{-5}$  (skupina 4).

Tóny z akordu	$g^1$	$hes^1$	$des^2$
Nástroje	sinus	harfa	příčná flétna

Tab. 5.11: Kombinace 5.3 pro nástroje z kategorie **M** akordu  $Ami^{-5}$  (skupina 4).

Tóny z akordu	$a^1$	$c^2$	$es^2$
Nástroje	zvonkohra	vibrafon	triangl

Tab. 5.12: Kombinace 5.4 pro nástroje z kategorie **M** akordu  $Hmi^{-5}$  (skupina 4).

Tóny z akordu	$h^1$	$d^2$	$f^2$
Nástroje	celesta	okarina	píkola

U této kombinace šlo o projev maskování pro různé nástroje z kategorie **M**. Všechny tóny nástrojů byly umístěny do středu stereo osy (0), aby se ukázalo, jaký dopad má různý počet vyšších harmonických složek u takto málo vyšších harmonických složek produkujících nástrojů.

### 5.1.4 Nahrávání jednotlivých tónů nástrojů

Pro vytvoření jednotlivých potřebných tónů nástrojů jsem si koupil banku zvuků symfonického orchestru EastWest Symphonic Orchestra Gold Complete a z banky zvuků Komplete 5 na VUT FEKT laboratorní místnosti SC 1.23 jsem použil akustickou kytaru a klavír. Jako nahrávací program jsem zvolil hudební editační program Steinberg Cubase LE AI Elements 10. Nástroje klavír a kytara jsem nahrál přes zvukovou banku Komplete 5 přímo přes počítač na VUT. Ostatní nástroje jsem nahrál přes MIDI pomocí elektrického pianu Yamaha DGX-230 a banky EastWest Symphonic Orchestra Gold Complete. Z banky zvuků tohoto pianu jsem přes sluchátkový výstup nahrál okarinu a sinus.

Musím také zmínit, že žádný nástroj a akord nebyl nijak zefektován.

### 5.1.5 Pojmenování akordů

Každá kombinace akordů pro mě měla vlastní pojmenování. Například akord *H* dur složený z kategorií nástrojů **M**, **S**, **V**, kde všechny tóny byly umístěny do středu stereo osy, jsem pojmenoval 1 *H* dur M S V – 0, kde 1 znamená pořadí, v jakém se akord bude přehrávat posluchačům, 0 znamená, že tóny se nacházejí uprostřed stereo osy. Další akord je např. takový: 3 *A7* sus4 V S S M – L100 L35 R35 R100. Zároveň platí, že písmeno určující nástroj z kategorií **M**, **S** a **V** odpovídá číslu určující pozici tónu nástroje na stereo ose. V tomto případě tedy V odpovídá prvnímu číslu 100, první S prvnímu číslu 35, druhé S druhému číslu 35 a M druhému číslu 100. Písmeno L znamená umístění tónu na levé straně stereo osy a R na pravé straně stereo osy. Celý seznam pořadí přehrávaných akordů podle tabulky 5.13 je uveden na další straně. Všechny akordy jsem vyexportoval ve formátu wav.

### 5.1.6 Určení pořadí přehrávaných akordů

Akordů je 28. Jejich pořadí bylo záměrně určeno tak, aby se žádný akord nebo jeho verze v rámci jednoho cyklu přehrávání neopakoval. Cyklem myslím to, že např. akord *H* dur M S V – 0 se přehrál jako první. Další verze tohoto akordu např. *H* dur MSV – L100 0 R100 se přehrál až jako devátý a ne hned za prvním akordem z toho důvodu, že pro vyhodnocení dotazníku jsem použil metodu sémantického diferenciálu (více popsané v 7). Různé psychologické metody totiž pro měření v psychoakustice doporučují zkoumané vzorky – v mém případě tedy akordy – odpovídajícím osobám předkládat za sebou, pokud vzorky vykazují podobné vlastnosti. U sémantického diferenciálu podle [1] nic takového nebylo. Navíc jsem si logickou úvahou řekl, že pokud v určitém akordu např. zase *H* dur MSV – 0 uslyší fagot a hned v následujícím akordu *H* dur M S V – L100 0 R100 by teoreticky fagot neslyšel (protože

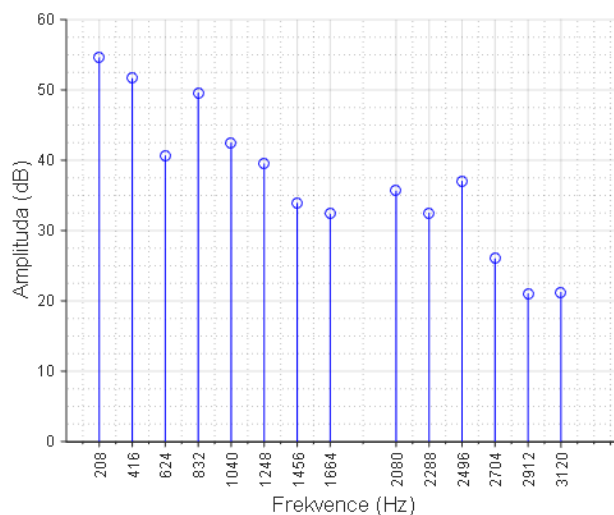
Tab. 5.13: Pořadí jednotlivých akordů pouštěných posluchačům.

Pořadí akordu	Název akordu	Kategorie vyš. harm.	Stereo rozložení
1	1 <i>H</i> dur	M S V	0
2	2 <i>H</i> dur	V M S	R35 L75 R75
3	3 <i>A</i> 7 sus4	V S S M	L100 L35 L35 R100
4	4 <i>C</i> phryg v.7	V S S M	L50 L35 R35 R50
5	5 <i>F</i> mi <sup>-5</sup>	M M M	0
6	6 <i>a h c</i> <sup>1</sup> <i>d</i> <sup>1</sup> <i>e</i> <sup>1</sup>	S S S S S	R100
7	7 <i>e</i> moll <i>e g h</i>	S S S	0
8	8 <i>H</i> dur	M S V	L100 0 R100
9	9 <i>H</i> dur	V M S	0
10	10 <i>A</i> 7 sus4	V S S M	L50 L35 R35 R50
11	11 <i>C</i> phryg v.7	V S S M	L100 L35 R35 R100
12	12 <i>G</i> mi <sup>-5</sup>	M M M	0
13	13 <i>a h c</i> <sup>1</sup> <i>d</i> <sup>1</sup> <i>e</i> <sup>1</sup>	S S S S S	L100 L50 0 R50 R100
14	14 <i>e</i> moll <i>E g h</i> <sup>1</sup>	S S S	0
15	15 <i>H</i> dur	M S V	L100
16	16 <i>H</i> dur	V M S	L100 0 R100
17	17 <i>A</i> 7 sus4	V S S M	L75 L75 R75 R75
18	18 <i>C</i> phryg v.7	V S S M	0
19	19 <i>A</i> mi <sup>-5</sup>	M M M	0
20	20 <i>a h c</i> <sup>1</sup> <i>d</i> <sup>1</sup> <i>e</i> <sup>1</sup>	S S S S S	L35 L35 0 R35 R35
21	21 <i>e</i> moll <i>g h e</i> <sup>1</sup>	S S S	0
22	22 <i>H</i> dur	M S V	R35 L75 R75
23	23 <i>H</i> dur	V M S	L100
24	24 <i>A</i> 7 sus4	V S S M	0
25	25 <i>C</i> phryg v.7	V S S M	L75 L75 R75 R75
26	26 <i>H</i> mi <sup>-5</sup>	M M M	0
27	27 <i>a h c</i> <sup>1</sup> <i>d</i> <sup>1</sup> <i>e</i> <sup>1</sup>	S S S S S	0
28	28 <i>e</i> moll <i>h e</i> <sup>1</sup> <i>g</i> <sup>1</sup>	S S S	0

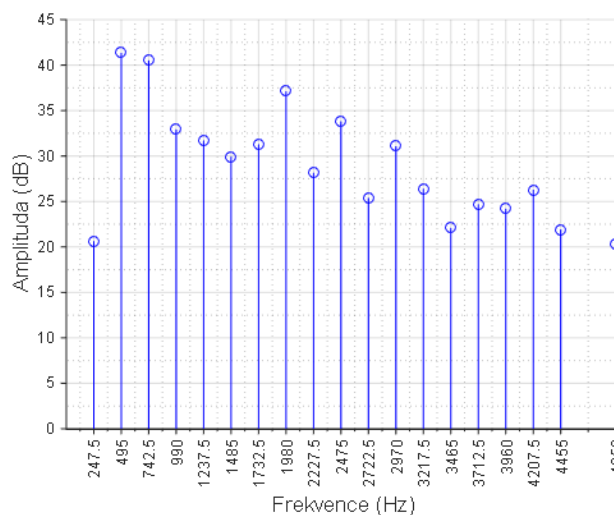
by měl být silně maskovaný), ale poznal by, že byl přehrán stejný akord se stejnými nástroji, tím pádem by tam fagot měl logicky být, posluchač by neobjektivně odpověděl a z toho důvodu by i celý výzkum byl neobjektivní.

Po připojení elektrických kláves, které mají dynamický úhoz klapek, k počítači jsem si v programu Cubase otevřel banku zvuků EastWest Symphonic Orchestra Gold Complete a nahrál jednotlivé tóny určené daným nástrojům. Každý tón v rámci

akordu je hrán na jiný nástroj kromě akordů hraných pouze na kytaru. Protože ale většina nástrojů při zahrání různou dynamikou produkuje různý počet vyšších harmonických složek, bylo potřeba si tyto počty jednoznačně určit. Jednotlivě jsem tedy vyexportoval každý tón a určení jsem provedl v programovacím jazyce Matlab. Skript k určování vyšších harmonických jsem převzal z [18] a podle [19] podle potřeb upravil. Tento skript je zahrnutý v příloze označený jako `urcovaniharmonickych.m` a více popsáný v kapitole 6. Pro představu spektrum vyšších harmonických složek pro violoncello a trubku použitých v mém výzkumu vypadá takto :



Obr. 5.1: Spektrum vyšších harmonických složek pro tón a violoncella.

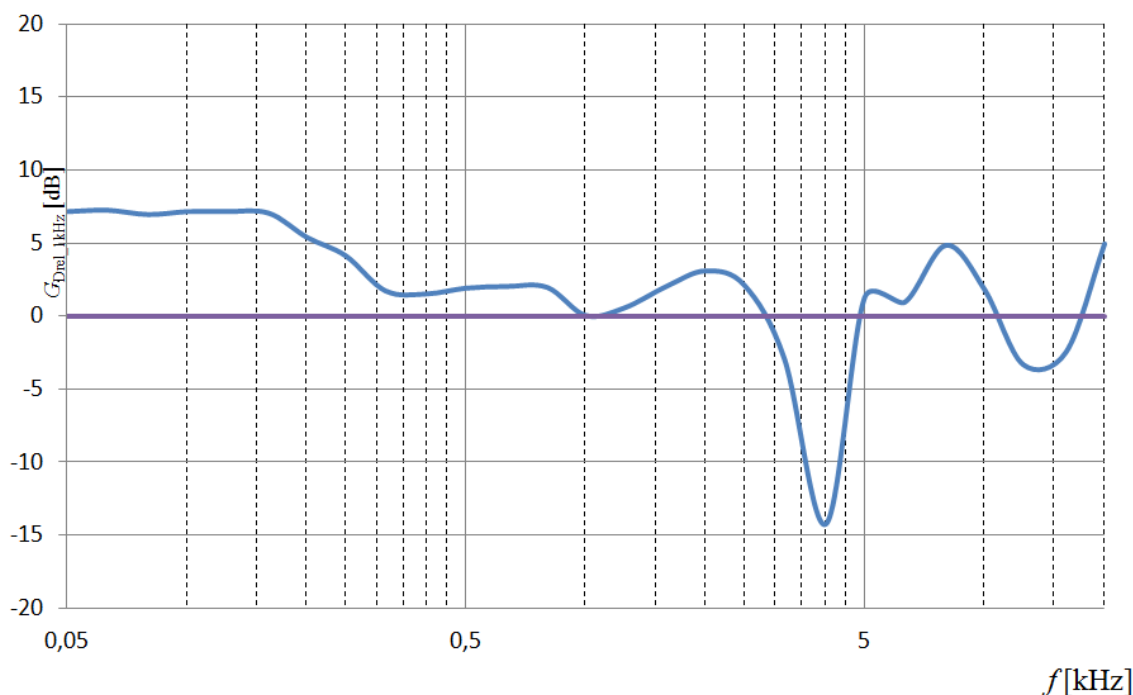


Obr. 5.2: Spektrum vyšších harmonických složek pro tón *h* trubky.

### 5.1.7 Výběr posluchačů

Posluchači byli vybráni z těchto škol: Ústav hudební vědy Filozofické fakulty Masarykovy univerzity, Konzervatoř Brno a Pedagogická fakulta obory Učitelství hudební výchovy pro ZŠ a SŠ a obor Učitelství pro 1. stupeň ZŠ. Posluchači byli vybráni záměrně s alespoň minimálním zaměřením v hudebních oborech, protože byla potřeba zaručit jejich schopnosti v rozeznávání různých nástrojů, které jim byly přehrávány ve zkoumaných akordech, protože čím větší je počet správně určených nástrojů, tím více jsou výsledky výzkumu významnější.

Poslech jsem s posluchači prováděl na různých místech, jako například ve školních knihovnách nebo v laboratorních učebnách. Aby se mi nestalo, že někteří posluchači by před reproduktory seděli v jiné pozici než jiní posluchači, každému z nich byla dána sluchátka, u kterých byla na VUT FEKT změřena kmitočtová odezva, která vypadá takto:



Obr. 5.3: Kmitočtová odezva použitých sluchátek vztažená k 1 kHz.

Platí, že způsob umístění reproduktorů může pro člověka vytvořit obrovský rozdíl ve frekvenčním vyvážení nahrávky a také v jejím stereo poli [13].

Posloucháním na sluchátka tedy vznikly stejné podmínky pro všechny posluchače. Dokonce z mého pilotního výzkumu, popsáném v podkapitole 5.2, se ukázalo, že pokud si posluchači nebyli jistí odpověďmi a nebo nedokázali odpovědět, dávali si ruce do kříže, „vrtěli“ sebou a různě na židlích posedávali. Navíc platí, že „zvuk, přicházející z určitého zdroje, je díky anatomickému uspořádání uší na hlavě odlišný



*v uchu pravém a levém, a to ve své frekvenčně specifické intenzitě a čase. Tato skutečnost platí jak pro děti, tak dospělé“ [20]. To byl další důvod pro použití sluchátek.*

### 5.1.8 Zařízení pro přehrání a úpravy před pilotním výzkumem

Všechny tóny byly nastaveny na hlasitost  $-3$  LU přes program HOFA 4U Meter, Fader & MS-Pan, aby nedošlo ke zvýhodnění některých nástrojů a tím pádem k intenzitnímu maskování. U akordů, kde byla potřeba zajistit stejnou dobu trvání všech tónů, jsem udělal automatizaci hlasitosti tak, aby hlasitost měla hodnotu  $-3$  LU. Po vyexportování všech akordů jsem nakonec změnil jejich hlasitost a upravil tak, aby měly všechny hodnotu  $-3$  LU. Akordy jsem pouštěl přes notebook Lenovo IdeaPad 310-15IKB se zapojenými sluchátky Kingston HyperX Cloud II do sluchátkového výstupu notebooku.

Důležité je také zmínit, že pro každého posluchače byla napěťová úroveň sluchátkového výstupu stejná.

## 5.2 Pilotní výzkum

*„Pilotní výzkum je předběžná studie v malém měřítku před hlavním výzkumem za účelem ověření proveditelnosti, zjištění časové náročnosti nebo vylepšení plánu výzkumu. Často se studie provádí před rozsáhlým kvantitativním výzkumem ve snaze ušetřit čas a peníze za nesprávně navržený projekt“ [21].*

Ukázalo se, že posluchači potřebovali několikrát slyšet vždy daný akord. Podle [7] nemá člověk při poslechu jedním uchem problémy rozeznat zvuky jako takové. Často se ale objevuje problém přenést pozornost z jednoho zdroje zvuku na druhý. Proto také byla posluchačům dána možnost znovu přehrání akordů. Navíc se ukázalo, že v akordech, kdy byly obsaženy nástroje z kategorie **V**, tedy se 17 vyššími harmonickými složkami a více, tyto nástroje posluchači uváděli hned jako první. Maximální počet přehrání každého akordu jsem nakonec stanovil na tři (dvě opakování), protože ke konci poslouchání po více opakováních byli posluchači unaveni a vykazovali známky lhostejnosti v hodnocení. Podle [22] jsou odhady rozpětí pozornosti zdravých teenagerů a dospělých od 10 do 20 minut, do čehož jsem se takto vešel.

## 6 Prostředí Matlab

Tato kapitola popisuje analýzu vyšších harmonických složek a dotazník vytvořený v grafickém prostředí programovacího jazyka Matlab.

### 6.1 Analýza vyšších harmonických složek

Pro výpočet harmonické analýzy v digitálním prostředí se využívá diskrétní Fourierovy transformace (DFT), ze které vychází rychlá Fourierova transformace (FFT). Přímá a zpětná diskrétní Fourierova transformace podle [4] vypadá takto:

$$S[k] = \sum_{n=0}^{N-1} s[n] e^{-jk\frac{2\pi}{N}n}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1,$$
$$s[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S[k] e^{-jk\frac{2\pi}{N}n}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1,$$

kde  $N$  je počet vzorků signálu,  $k$  je pořadí vzorku v časové doméně a  $n$  je pořadí vzorku ve frekvenční doméně [4].

Ve skriptu `urcovaniharmonickych.m` uvedeném v příloze si uživatel nejdříve zvolí jméno vzorku, který chce zanalyzovat. Poté se vypočítá FFT vzorku, určí se základní harmonická složka. Dále se vypočítají zbývající vyšší harmonické složky – jejich frekvence a amplitudy. Odstraní se duplikáty a uživateli se zobrazí spektrum.

### 6.2 Dotazník v grafickém prostředí Matlab

Pro vytvoření dotazníku jsem použil literaturu [24], [25]. Nejdříve jsem si udělal návrh v programu Malování. Protože jsem potřeboval, aby se hodnoty od jednotlivých posluchačů někam zapisovaly, rozhodl jsem se pro zápis do MS Excel. Aby se mě posluchači nemuseli ptát na hodnoty ze škály, vytvořil jsem fixní škálu. Předem jsem také věděl, že musím zahrnout tlačítko pro přehrání znovu. Musely tam také být kolonky pro vepsání názvů nástrojů, ohodnocení srozumitelnosti jednotlivých akordů a jednotlivých nástrojů. Protože nástrojů v rámci akordů mohlo být maximálně pět, kolonek je také pět. Pak vždy byla potřeba přeskočit na další vzorek. To se provedlo tlačítkem Další. Posluchači také napsali, na které nástroje hrají. Před vyplňováním jsem si zvolil jméno Excel souboru a při každém vyplnění kolonek v rámci přehrávaného akordu jsem stlačil tlačítko Zapiš do Excel, aby se hodnoty uložily. Tlačítkem Konec se dotazník zavře. Jak dotazník vypadal, je ukázáno na následujícím obrázku 6.1.

Hodnoticí škála

	1 - mimořádně
Srozumitelný	2 - velmi
	3 - poněkud
	4 - ani srozumitelný, ani nesrozumitelný
	5 - poněkud
Nesrozumitelný	6 - velmi
	7 - mimořádně

Vaše hodnocení akordu

Které nástroje slyšíte?	Srozumitelnost nástrojů	Srozumitelnost akordu
<div style="background-color: red; height: 20px;"></div>	<div style="background-color: green; height: 20px;"></div>	<div style="background-color: blue; height: 20px;"></div>
<div style="background-color: red; height: 20px;"></div>	<div style="background-color: green; height: 20px;"></div>	
<div style="background-color: red; height: 20px;"></div>	<div style="background-color: green; height: 20px;"></div>	
<div style="background-color: red; height: 20px;"></div>	<div style="background-color: green; height: 20px;"></div>	
<div style="background-color: red; height: 20px;"></div>	<div style="background-color: green; height: 20px;"></div>	

Zapiš do Excel

Počet akordů: 28

Číslo akordu: 1

Přehrát akordy

Začít

Přehrát znovu

Další

Zadej název souboru                     .xls

Na jaký nástroj hrajete?

Konec

Obr. 6.1: Dotazník v prostředí Matlab.

Zapisování hodnot do MS Excel bylo určeno takto: pokud hraje akord číslo 1, číslo 1 se zapíše do kolonky A1. Pokud hraje akord číslo 2, číslo 2 se zapíše do kolonky A2 atd. Každý řádek tedy náleží vždy jednomu akordu. Tedy 1. řádek pro akord 1, 2. řádek pro akord 2 atd. Sloupeček B Excelu odpovídá prvnímu červenému obdélníku. Sloupeček C odpovídá prvnímu zelenému obdélníku. Sloupeček D odpovídá druhému červenému obdélníku, sloupeček E druhému zelenému obdélníku. Sloupeček F odpovídá třetímu červenému obdélníku. Sloupeček G odpovídá třetímu zelenému obdélníku. Sloupeček H odpovídá čtvrtému červenému obdélníku, sloupeček I čtvrtému zelenému obdélníku. Sloupeček J odpovídá pátému červenému obdélníku, sloupeček K odpovídá pátému zelenému obdélníku. Sloupeček L odpovídá modrému obdélníku. Kolonka M1 odpovídá růžovofialovému obdélníku. Pro lepší představu uvádím následující obrázek. Vytvořil jsem si návrh dotazníku v programu Malování s určováním, kam se hodnoty mají zapisovat. Obrázek není pojmenovaný, protože plovoucí prostředí programu LaTeX i přes použité příkazy k umístění obrázku na stránce odsunul obrázek na nevhodné místo a pokud v plovoucím prostředí obrázek není, nepřišel jsem na způsob, jak nastavit pojmenování, aby stylisticky odpovídalo formě.

		mimořádně	velmi	poněkud	ani srozumitelný, ani nesrozumitelný	poněkud	velmi	mimořádně	
		srozumitelný							nesrozumitelný
		1	2	3	4	5	6	7	

<p>Které nástroje jste slyšel(a) ?</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>↔ B1</p> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Fagot</div> <p>↔ D1</p> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Klavír</div> <p>↔ F1</p> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Housle</div> <p>↔ H1</p> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"></div> <p>↔ J1</p> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px;"></div> </div> <div style="width: 45%;"> <p>↔ C1</p> <div style="border: 1px solid green; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">6</div> <p>↔ E1</p> <div style="border: 1px solid green; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">4</div> <p>↔ G1</p> <div style="border: 1px solid green; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">1</div> <p>↔ I1</p> <div style="border: 1px solid green; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"></div> <p>↔ K1</p> <div style="border: 1px solid green; padding: 5px;"></div> </div> </div>	<p>Ohodnoťte srozumitelnost akordu</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>↔ L1</p> <div style="border: 1px solid blue; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">5</div> </div> <div style="width: 45%;"> <p>↔ A1</p> <div style="border: 1px solid yellow; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">1</div> </div> </div>	<p>Číslo akordu</p> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px; background-color: #800000; color: yellow; text-align: center;">ZAČÍT</div> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px; background-color: #800000; color: yellow; text-align: center;">PŘEHRÁT ZNOVU</div> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px; background-color: #800000; color: yellow; text-align: center;">DALŠÍ</div>
--	--	---

Na jaký nástroj hrajete ? banjo, kontrabas ↔ M1

Skript dotazníku je uveden v příloze pod názvem GUIdotaznik.m.

## 7 Vyhodnocení dotazníku

K vyhodnocení dotazníku jsem použil metodu sémantického diferenciálu, která je popsána v následující podkapitole. Pro použití této metody jsem měl dva důvody: první byl již vysvětlen v části 5.1.6 a druhý důvod je podle [23] ten, že hudební podnět oslovuje sémantický systém našeho mozku.

### 7.1 Metoda sémantického diferenciálu

Metodu sémantického diferenciálu vyvinul počátkem 50. let 20. století Američan Charles Egerton Osgood. O několik let později ji v upravené podobě tzv. metody polaritního profilu zavedl do evropské psychologie Němec P. R. Hofstätter. Metoda sémantického diferenciálu se zezáčátku používala k zjišťování a měření významu pojmů, později našla uplatnění při zkoumání osobnosti, v sociologii, experimentální estetice i jinde. Pomyslně jde o velmi jednoduchou techniku, odvozenou z metody posuzování objektů na subjektivních posuzovacích škálách. Díky tomu, že při použití techniky sémantického diferenciálu jsou objekty posuzovány z mnoha dílčích hledisek, je možné jejich komplexní posouzení, odvozené ze souhry či rozporu mezi dílčími hodnoceními. V psychoakustickém výzkumu se metoda sémantického diferenciálu používá k zjišťování základních percepčních dimenzí vícerozměrných subjektivních veličin jako je barva zvuku, celková kvalita reprodukce zvuku, rušivost hluku apod [1].

Podstatou této metody je, že při měření se od pokusné osoby žádá, aby vyšetřované objekty – v psychoakustice jde obvykle o zvukové podněty (v mém případě tedy akordy) – postupně posoudila na několika bipolárních grafických posuzovacích škálách. Já jsem ovšem použil pouze jednu škálu, protože v této práci šlo o zkoumání srozumitelnosti jednotlivých nástrojů a akordů v rámci každého přehraného akordu. Škály bývají nejčastěji sedmistupňové a jejich póly (tj. extrémní hodnoty) jsou definovány dvojicemi antonymních, tedy protikladných, pojmů, zpravidla adjektiv. Má dvojice byla srozumitelný/nesrozumitelný. K slovnímu označení jednotlivých stupňů škály se používají výrazy jako „mimořádně“, „velmi“, „poněkud“, „ani ..., ani ...“. Při zpracování soudů, které pokusné osoby vyjádřily označením těch poloh na škále, které nejlépe odpovídají jejich posouzení podnětu, se nejprve podle zvoleného klíče každému stupni škály přiřadí odpovídající číselná hodnota [1]. Celá posuzovací škála spolu s číselnými hodnotami vypadala takto:

	mimořádně	velmi	poněkud	ani srozumitelný, ani nesrozumitelný	poněkud	velmi	mimořádně	
srozumitelný	1	2	3	4	5	6	7	nesrozumitelný

Z aritmetických průměrů, vypočtených buď z dat získaných od všech posuzovatelů nebo zvláště pro různé specifické skupiny posuzovatelů, se dá pro každý z posuzovaných podnětů sestavit jeho polaritní profil. Ten znázorňuje, do jaké míry se k podnětu vztahují percepční atributy reprezentované jednotlivými páry antonymních adjektiv [1]. Já mám však použitý jen jeden pár, proto se výsledky budou vztahovat pouze k němu. Grafické znázornění průměrů pomocí polaritního profilu zde však nebude ukázáno, protože by zabralo zbytečně mnoho místa. Nejdůležitější jsou totiž samotné hodnoty aritmetických průměrů. Polaritní profily pouze slouží ke grafické představě průměrů.

Jestliže se se stejnými posuzovateli (zde tedy posluchači) provádí měření vícekrát, lze pak na nasbíraná data aplikovat faktorovou analýzu [1]. V mém případě ale posluchači byli studenti a jejich časové možnosti byly velice omezené, takže měření proběhlo pouze jednou. Faktorová analýza tedy nebyla využita.

## 7.2 Výsledky

V některých případech určování nástrojů posluchači neurčili nástroj správně. Řekl jsem si, že s tímto faktem musím při vyhodnocování počítat, protože procento posluchačů, kteří nástroje uhádli, se lišilo. To tedy také zapříčinilo významnost hodnot aritmetických průměrů pro každý nástroj a akord. Tedy pokud například jeden nástroj uhádlo 90% posluchačů a jiný nástroj uhádlo jen 10% posluchačů, první nástroj je mnohem srozumitelnější a tedy i méně maskován. Proto jsem pro každý nástroj vypočítal jeho procento uhádnutí. Skript k výpočtu aritmetických průměrů a procent uhádnutí nástrojů je v příloze spolu s ostatními skripty a na přiloženém CD pod názvem `prumery.m`.

Následující tabulky ukazují výsledky pro všechny použité akordy. Tabulky nejsou nijak označeny, protože prostředí LaTeX mi při použití plovoucího prostředí tabulek neumožnilo tabulky dávat pěkně za sebou i přesto, že jsem použil příkazy pro umístění tabulek na stránce (příkazy – `!h`, `htbp` apod.).

### 7.2.1 Kytara

- Výsledky pro akustickou kytaru

Pro akordy akustické kytary se ukázalo, že srozumitelnost jak nástroje, tak akordů nezáleží na převratech ani rozšíření intervalů mezi tóny. Přestože se ve dvou případech 96% posluchačů shodlo na menší srozumitelnosti kytary pro první a čtvrtý akord, beru v potaz to, že z rozdílu 10% oproti druhému a třetímu akordu by mohlo několik jiných posluchačů, kteří by kytaru poznali, uhádnout kytaru a rozdíl srozumitelností by se tak vyrovnal.

Akord	Nástroj/(%) Kytara	Aritm. průměr akordů
e moll e g h – 0	1,9/( <b>96</b> )	1,4
e moll g h e <sup>1</sup> – 0	1,5/( <b>86</b> )	1,5
e moll h e <sup>1</sup> g <sup>1</sup> – 0	1,5/( <b>86</b> )	1,2
e moll E g h <sup>1</sup> – 0	1,9/( <b>96</b> )	1,6

## 7.2.2 Akordy H dur

- Výsledky pro akordy ze skupiny 3

Akord	Nástroje /(%)			Aritm. průměr akordů
	Fagot	Klavír	Housle	
H dur MSV – 0	4,6/( <b>25</b> )	2,3/( <b>43</b> )/	2,2/( <b>82</b> )	2,7
H dur MSV – L100	4,2/( <b>21</b> )	3,4/( <b>50</b> )	2,4/( <b>90</b> )	3,2
H dur MSV – R35 L75 R75	2,2/( <b>18</b> )	2,7/( <b>71</b> )	3,2/( <b>82</b> )	3,2
H dur MSV – L100 0 R100	4,3/( <b>36</b> )	2,8/( <b>46</b> )	3,0/( <b>75</b> )	3,4

Pro akord H dur MSV se překvapivě nepotvrdilo, že při rozložení L100 0 R100 není nejsrozumitelnější. Ba naopak. Nejlépe srozumitelný byl akord v rozložení 0.

Pro fagot se ale jako nejlepší umístění ukázal právě akord L100 0 R100. Tomuto faktu dávám vyšší váhu pro procento posluchačů, kteří fagot uhádli oproti ostatním rozložením.

Klavír byl nejlépe rozpoznáný v rozložení R35 L75 R75, kdy byl umístěn na pozici L75, tedy na druhé straně od obou zbývajících nástrojů, takže se dá potvrdit, že zde byl nejméně maskován.

Nejvíce dominující a rozpoznané byly ovšem housle. Zde se potvrzuje, že nástroj z kategorie **V** „přebil“ ostatní nástroje z jiných kategorií, a to ve všech případech stereo rozložení. Byl tedy i nejlépe srozumitelný, nejvíce v rozložení 0. Také se ukázalo, že housle byly nejvíce srozumitelné v případech, kdy nástroje byly umístěny na jednom místě. V případě rozložení R35 L75 R75 se potvrdilo, že housle ze všech akordů zde téměř pro všechny posluchače zamaskovaly fagot, který byl umístěn na stejné straně stereo osy, přestože ho posluchači ohodnotili ze všech jeho případů nejlépe, uhodl ho nejmenší počet a tomu dávám větší váhu. Naproti tomu se pro klavír ukázalo umístění vlevo na pozici L75 (tedy nejdále od houslí ze všech akordů) jako nejlepší pro rozpoznání.

V případě akordu H dur VMS byla situace podobná jako pro H dur MSV. Nejlépe srozumitelná byla trubka z kategorie **V**. Ve všech případech byla téměř shodně srozumitelná. Ovšem oproti houslím z akordu H dur MSV v rozložení L100 0 R100

Akord	Nástroje/(%)			Aritm. průměr akordů
	Trubka	Marimba	Kytara	
<i>H</i> dur VMS – 0	2,0/( <b>96</b> )	3,6/( <b>18</b> )	2,9/( <b>54</b> )	2,9
<i>H</i> dur VMS – L100	2,0/( <b>75</b> )	2,3/( <b>21</b> )	2,9/( <b>50</b> )	2,6
<i>H</i> dur VMS – R35 L75 R75	1,9/( <b>89</b> )	3,0/( <b>21</b> )	3,1/( <b>57</b> )	3,3
<i>H</i> dur VMS – L100 0 R100	2,1/( <b>96</b> )	3,6/( <b>18</b> )	3,0/( <b>61</b> )	2,8

byla stejně srozumitelná jako v případě rozložení 0. Je vidět, že nástroje z kategorií **V** jsou nejlépe uhádnutelné. Pro kytaru se ukázalo, že pokud byla společně s ostatními nástroji na jednom místě, byla v podstatě shodně srozumitelná, jako když byla umístěna vzdáleněji od ostatních nástrojů, ovšem se ukázalo, že nejvíce posluchačů ji poznalo v rozložení L100 0 R100, kdy byla umístěna uprostřed. Marimba byla nejméněkrát rozpoznána, přestože její ohodnocení srozumitelnosti je podobné kytáře. Důvod nízkého procenta je podle mě ten, že lidé nejsou na marimbu zvyklí, tudíž je nástroj ani nenapadne. Tento fakt se objevuje v dalších případech akordů, které jsou dále uvedeny. Marimba má podle obrázku 8.6 neharmonické spektrum a obsahuje pouze jednu vyšší harmonickou složku, což ovlivňuje její schopnost se projevit v rámci akordu.

### 7.2.3 Klastř

- Výsledky pro akordy ze skupiny 3

Akord	Nástroje(%)					A.p.akordů
	Cello	A. roh	L. roh	Pozoun	Klavír	
<i>a h c<sup>1</sup> d<sup>1</sup> e<sup>1</sup></i> – 0	3,3( <b>64</b> )	5,0( <b>7</b> )	4,0( <b>11</b> )	5,0( <b>4</b> )	2,9( <b>89</b> )	3,6
<i>a h c<sup>1</sup> d<sup>1</sup> e<sup>1</sup></i> – R100	2,8( <b>61</b> )	6,0( <b>7</b> )	6,0( <b>7</b> )	6,0( <b>7</b> )	3,4( <b>57</b> )	4,4
<i>a h c<sup>1</sup> d<sup>1</sup> e<sup>1</sup></i> – L35 L35 0 R35 R35	3,3( <b>54</b> )	3,5( <b>14</b> )	4,5( <b>7</b> )	3,5( <b>7</b> )	3,0( <b>75</b> )	3,7
<i>a h c<sup>1</sup> d<sup>1</sup> e<sup>1</sup></i> – L100 L50 0 R50 R100	3,4( <b>46</b> )	3,1( <b>25</b> )	5,0( <b>18</b> )	5,3( <b>18</b> )	2,7( <b>61</b> )	3,4

U tohoto klastru se projevilo, že umístění všech nástrojů doprava tvoří nejméně srozumitelný akord. Totéž platí pro nástroje anglický roh, lesní roh, pozoun a klavír.

Klavír byl nejlépe rozpoznatelný při rozložení 0. Celkově vychází jako nejvíce uhádnutý. Myslím, že je to pro jeho typickou barvu (spektrum je na obrázku 8.11), kterou zná téměř každý. Ukazuje se rozdíl, že při rozložení v 0 byl klavír nejlépe poznat a při rozložení R100 nejhůře, přestože v obou případech byly všechny nástroje umístěny na jednom místě. Podle mě je to proto, že při poslechu jedním uchem klesá práh slyšitelnosti o 3 dB, a proto posluchač neslyší tak konkrétně jednotlivé nástroje.



Všechny dechové nástroje 8.8, 8.9, 8.10 vyšly jednoznačně nejhůře. Jejich výsledky jsou téměř shodné. Zajímavostí je, že anglický roh má stejný počet vyšších harmonických složek jako violoncello, a lesní roh s pozounem stejně jako klavír. V případě největšího rozložení L100 L50 0 R50 R100 se ukazuje, že je uhádlo největší procento posluchačů. Nejhůře vycházejí při rozložení na jednom místě v 0 a R100.

Violoncello 8.7 se naopak projevilo jako nejvíce srozumitelné a rozpoznatelné při umístěních 0 a R100. I přes 3% rozdíl uhádnutí rozložení v 0 oproti R100 beru jako nejvíce srozumitelné rozložení v 0, protože zbývajících 3% posluchačů by teoreticky mohla změnit celkový aritmetický průměr ohodnocení.

## 7.2.4 Nástroje z kategorie M

- Výsledky pro akordy ze skupiny 3

Srozumitelnost všech akordů je téměř shodná kromě akordu  $A_{mi}^{-5}$ , kde podle mého názoru triangel ovlivnil ohodnocení v prospěch celého akordu.

Akord	Nástroje/(%)			Aritm. pr. akordu
$F_{mi}^{-5} - 0$	Fagot 4,0/( <b>21</b> )	Marimba 3,1/( <b>40</b> )	Klarinet 2,4/( <b>68</b> )	3,6

Z tohoto akordu vyšel jednoznačně nejhůře fagot. Poznalo ho jen 21% posluchačů a průměrně jej ohodnotili na 4,0, tedy ani srozumitelný, ani nesrozumitelný. Zvláštností je, že při porovnání spekter fagotu 8.12 a marimby 8.13 vidíme, že marimba produkovala pouze základní tón (oproti fagotu produkujícím 3 vyšší harmonické složky), a přesto ji poznalo dvakrát více posluchačů a ohodnotili ji jako srozumitelnější. Klarinet s průměrnou hodnotou 2,4 vyšel nejlépe ze všech a poznalo ho také nejvíce posluchačů (68%). Důvodem je podle mě opět to, že ze všech tří nástrojů klarinet zná obecně nejvíce lidí. Navíc podle jeho spektra 8.14 je vidět, že produkuje nejvíce vyšších harmonických složek, kde intenzitně převažují 3. a 5. lichá složka, což udává jeho typickou barvu.

Akord	Nástroje/(%)			Aritm. pr. akordu
$G_{mi}^{-5} - 0$	Sinus 5,0/( <b>4</b> )	Harfa 2,8/( <b>40</b> )	Příčná flétna 3,2/( <b>68</b> )	3,6

V tomto akordu poznaly sinus pouze 4% lidí. Tím se tedy ukazuje, že ho ostatní nástroje téměř spolehlivě zamaskují. Pro tři posluchače, kteří sinus poznali, je jeho srozumitelnost průměrně 5,0. Harfa dopadla mnohem lépe. Dosáhla srozumitelnosti 2,8 pro 40% posluchačů. Hodnotu srozumitelnosti ovšem opět nemůžeme brát tolik spolehlivě, protože při větším počtu posluchačů by se mohla změnit. Příčná flétna se ukázala jako nejlépe poznatelná s výsledkem srozumitelnosti 3,2. V souvislosti s výsledky uhádnutí sinu a porovnání spekter těchto tří nástrojů 8.15, 8.16, 8.17

je očividné, že sinus se v tomto stereo rozložení nemůže nijak výrazně projevit, protože je ostatními nástroji zamaskován. Přestože příčná flétna produkuje o jednu vyšší harmonickou složku méně než harfa, uhádlo ji více posluchačů. Tudíž jejímu ohodnocení dávám nejvyšší váhu ze všech tří nástrojů.

Akord	Nástroje/(%)			Aritm. pr. akordu
$A_{mi}^{-5} - 0$	Zvonkohra 2,4/(18)	Vibrafon 5,0/(7)	Triangl 1,8/(93)	2,9

Jak již bylo řečeno v úvodu této části, aritmetický průměr tohoto akordu byl nejnižší ze všech akordů této kategorie. Podle mě díky vysoké úspěšnosti uhádnutí trianglu (93%). Ten také ze všech nástrojů měl nejlepší ohodnocení srozumitelnosti. Naopak nejhůře dopadl vibrafon, kdy ho navíc poznalo nejméně posluchačů s ohodnocením 5,0. Zvonkohra byla srozumitelná na 2,4, ale protože ji uhádlo pouze 18% posluchačů, nelze její hodnotu srozumitelnosti považovat za příliš významnou. Spektra 8.18, 8.19, 8.20 ukazují, že triangl má nejvíce vyšších harmonických složek, vibrafon žádnou, což je v podstatě sinus, a zvonkohra má dvě. Druhá harmonická vyšší složka zvonkohry má téměř shodnou frekvenci jako druhá harmonická vyšší složka trianglu, avšak u zvonkohry je o 14 dB tišší, což zapříčinilo kmitočtové maskování, a proto také tímto mohla ztratit svoji barvu, podle které by se posluchači mohli rozhodnout pro určení zvonkohry.

Akord	Nástroje/(%)			Aritm. pr. akordu
$H_{mi}^{-5} - 0$	Celesta 0,0/(0)	Okarina 6,5/(7)	Pikola 2,0/(32)	3,2

V tomto akordu vůbec nebyla uhádnuta celesta, což přisuzuji tomu, že ji posluchači neznají natolik, aby si ji vybavili. Okarinu poznalo pouze 7% posluchačů a ohodnotili ji mezi velmi nesrozumitelnou a mimořádně nesrozumitelnou. Toto číslo by se samozřejmě mohlo opět změnit, pokud by procento poznání nástroje posluchači bylo vyšší. Nejlépe vychází pikola s ohodnocením 2,0 a 32%. Její rozdíl určení oproti ostatním nástrojům je podle mě ten, že její typická „pisklavost“ ji pomohla posluchačům určit. Také v případech správného určení ji uváděli hned jako první ze všech nástrojů. Spektra nástrojů A.1, A.2, A.3 jsou uvedena v příloze proto, že program LaTeX mi neumožnil pokračovat v sazbě dalších obrázků do textu. Stejně tak jsou uvedena spektra pro nástroje z akordů A7 sus4 a C phryg v.7.

### 7.2.5 A7 sus4, C phryg v.7

- Výsledky akordů ze skupiny 2

Z této kombinace akordů byl nejlépe ohodnocen akord v rozložení 0. Překvapivě nejhůře dopadl akord L100 L35 R35 R100, u kterého byl předpoklad nejlepší srozumitelnosti.

Akord	Nástroje/(%)				Ar. pr. akordů
	Housle	Hoboj	Klarinet	Sinus	
A7 sus4 – 0	2,3/(64)	3,5/(7)	2,3/(54)	0,0/(0)	2,9
A7 sus4 – L50 L35 R35 R50	2,7/(79)	3,5/(7)	3,2/(64)	0,0/(0)	3,5
A7 sus4 – L75 L75 R75 R75	2,5/(71)	2,8/(14)	2,7/(68)	3,0/(4)	3,6
A7 sus4 – L100 L35 R35 R100	2,8/(82)	4,7/(11)	3,5/(86)	5,0/(4)	3,9

Ze všech nástrojů skončil nejhůře sinus. V případech rozložení 0 a L50 L35 R35 R50 ho neuhodl nikdo, což přisuzuji tomu, že v 0 byl opět zamaskován a v druhém rozložení posluchači slyšeli barvu klarinetu, kde sinus nerozpoznali. 4% posluchačů uhádla sinus v ostatních rozloženích, ale v rozložení L100 L35 R35 R100 ho překvapivě ohodnotili jako méně srozumitelnější, přestože byl umístěn na pozici R100 a klarinet by jej neměl tolik maskovat. To přisuzuji tomu, že podle kapitoly 4 víme, že při monaurálním poslechu (což je případ pro umístění nástrojů v L100 a R100 na stereo ose) je binaurální práh nižší o 3 dB, tedy sinus byl o tolik méně slyšet. Hoboj dopadl o něco lépe. Nejvíce srozumitelný byl v rozložení L75 L75 R75 R75, kdy byl umístěn na pozici L75. Ačkoliv ho uhádlo pouze 14%, ukazuje se, že pokud nebyl v blízkosti rozložení ke klarinetu (což je případ tohoto rozložení, klarinet byl na pozici R75), byl oproti ostatním rozloženíům lépe poznat. To přisuzuji tomu, že si většina posluchačů vybavila klarinet, který je nejspíše obecně více známý, ale už si nevybavili hoboje. Spektra těchto dvou nástrojů jsou uvedena v příloze na obrázcích A.5, A.6.

Klarinet uhádlo výrazně více posluchačů. Nejvíce srozumitelný byl v rozložení 0, ale znovu je zde procentuální rozdíl oproti ostatním rozloženíům, takže za nejvýznamnější považuji ohodnocení v rozložení L100 L35 R35 R100.

Housle jako zástupce z kategorie **V** (nástroje produkující 17 a více vyšších harmonických složek) ohodnocením srozumitelnosti dopadly nejlépe. Nejvíce posluchačů je uhádlo v rozložení L100 L35 R35 R100. Podobné procento posluchačů je určilo v rozložení L50 L35 R35 R50 a dali jim téměř shodné ohodnocení. Úspěšnost tohoto nástroje přisuzuji tomu, že jsou obecně velice známé a rozpoznání pomohl i velký počet vyšších harmonických složek, které nástroji pomohly se mezi ostatními dobře prosadit.

Akord	Nástroje/(%)				A. p. akordů
	Housle	Hoboj	Klarinet	Sinus	
C phryg v.7 – 0	2,4/(68)	2,8/(14)	2,7/(68)	3,0/(4)	3,6
C phryg v.7 – L50 L35 R35 R50	3,6/(79)	5,0/(11)	3,8/(61)	0,0/(0)	4,6
C phryg v.7 – L75 L75 R75 R75	2,5/(68)	4,3/(11)	2,6/(79)	5,0/(4)	2,9
C phryg v.7 – L100 L35 R35 R100	3,2/(86)	4,2/(18)	3,1/(61)	4,0/(4)	3,5

U tohoto akordu jsem především zkoumal, jak se projeví maskovací účinek houslí vůči hoboj. Překvapivě se ukázalo, že ve srovnání s předchozím akordem zde hoboj dopadl o něco lépe, přestože housle a hoboj v tomto akordu byly o půl tónu od sebe. Nejvíce byl poznán v případě rozložení L100 L35 R35 R100, což odpovídá teorii, že zde byl nejméně maskován houslemi.

Stejně jako hoboj, byly i housle nejlépe rozpoznány v rozložení L100 L35 R35 R100, poté v rozložení L50 L35 R35 R50. Ostatní dvě rozložení sice ukázaly lepší srozumitelnost, ale menší procento uhádnutí, takže prvním dvěma rozložení dávám větší váhu a znovu se potvrzuje, že nástroj z kategorie **V** se dokázal nejlépe ze všech prosadit.

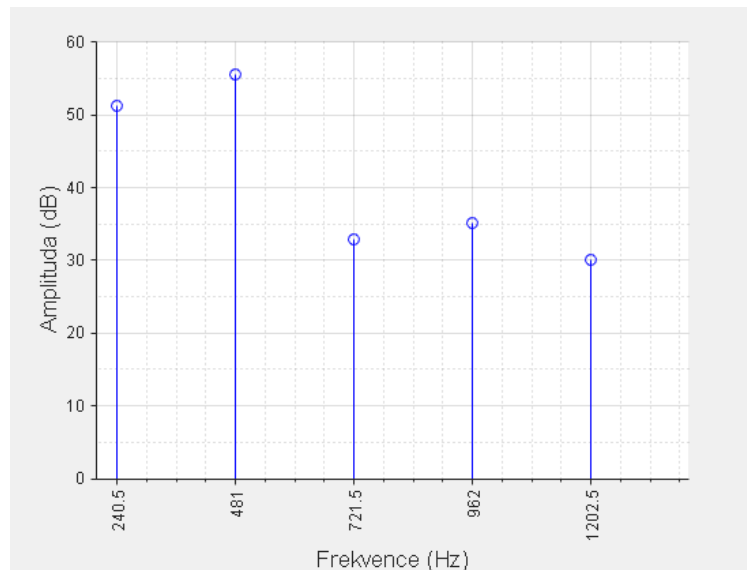
Klarinet byl nejvíce poznat v rozložení L75 L75 R75 R75, a to výrazněji oproti ostatním rozložení. To přisuzuji tomu, že byl umístěn na jedné straně spolu se sámem, který jej nemohl nijak zamaskovat. V rozložení 0 byl poznán v 68% případů. Zde znovu dávám tvrzení, že pro svou typickou barvu jej oproti hoboj uškodilo tolik posluchačů. Nepotvrzuje se ale, že by měl být houslemi maskován. Překvapivě nejhůře byl poznat v rozložení L100 L35 R35 R100 (stejně jako v L50 L35 R35 R50).

Sinus v případech rozpoznání vždy uhodla 4% posluchačů. V rozložení L75 L75 R75 R75 byl ohodnocen jako poněkud nesrozumitelný, což byl jeho nejhorší výsledek. V rozložení L100 L35 R35 R100 dopadl o jeden bod lépe, což je podle mě proto, že byl umístěn na kraji stereo osy. V rozložení 0 byl překvapivě ještě více srozumitelný, ačkoliv by měl být úplně zamaskovaný ostatními nástroji. V rozložení L50 L35 R35 R50 jej neuhádl nikdo.

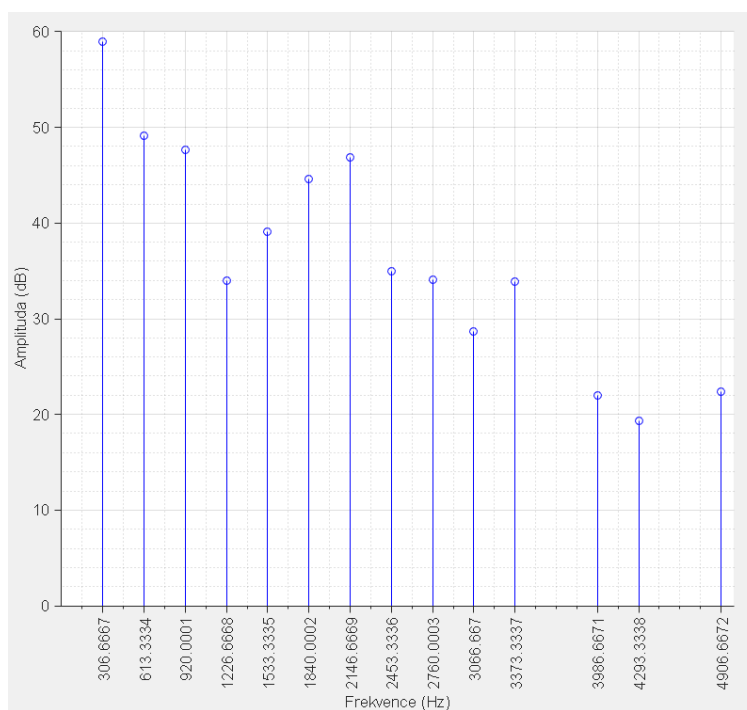
Spektra nástrojů jsou na obrázcích A.8, A.9, A.10, A.11.

## 8 Spektra použitých nástrojů

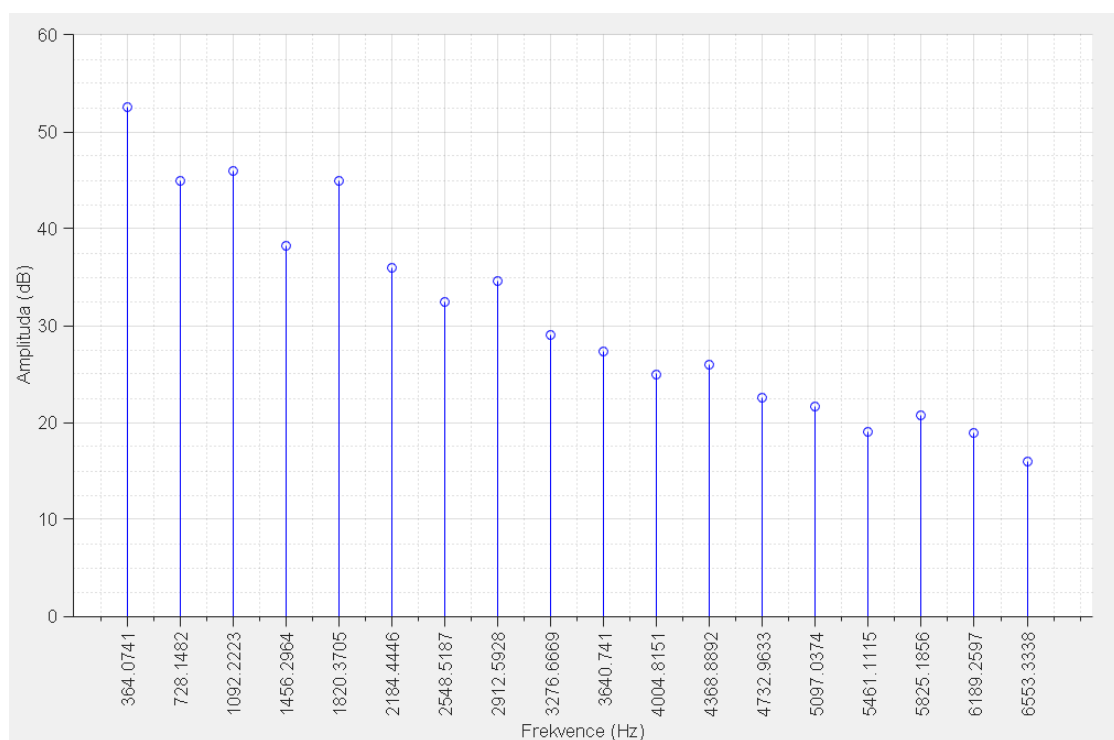
### 8.1 Akordy *H* dur



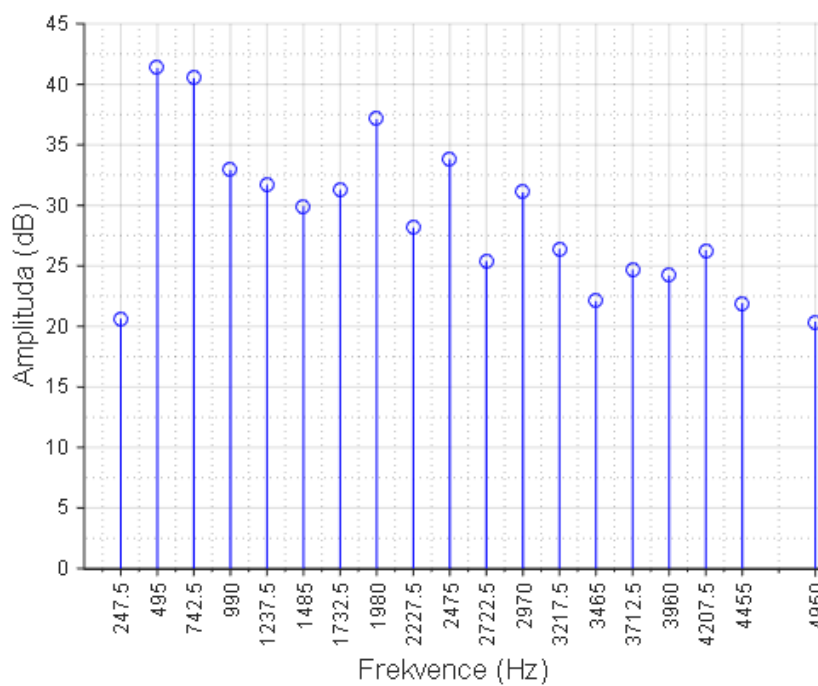
Obr. 8.1: Spektrum pro fagot h akordu *H* dur MSV.



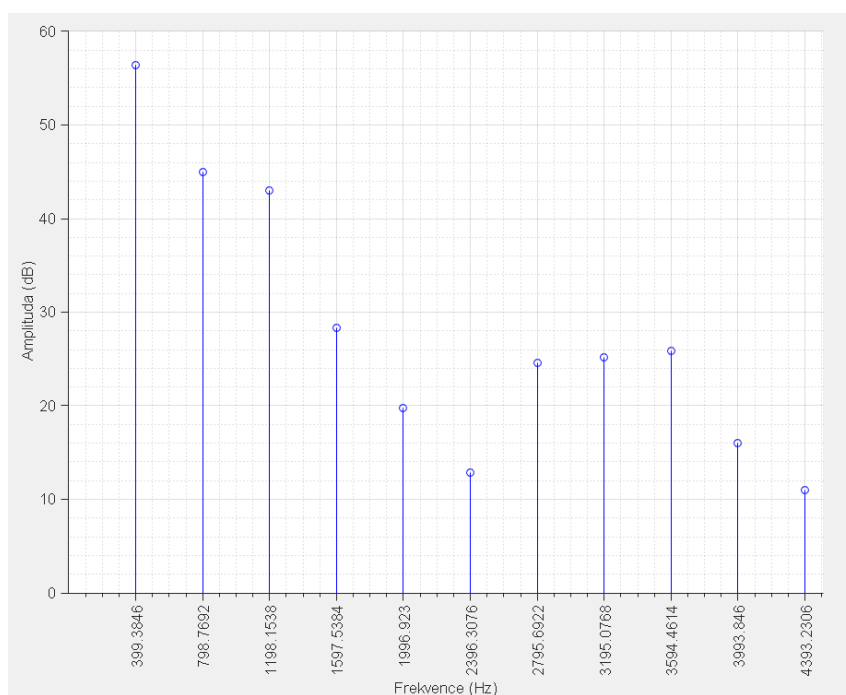
Obr. 8.2: Spektrum pro klavir dis<sup>1</sup> akordu *H* dur MSV.



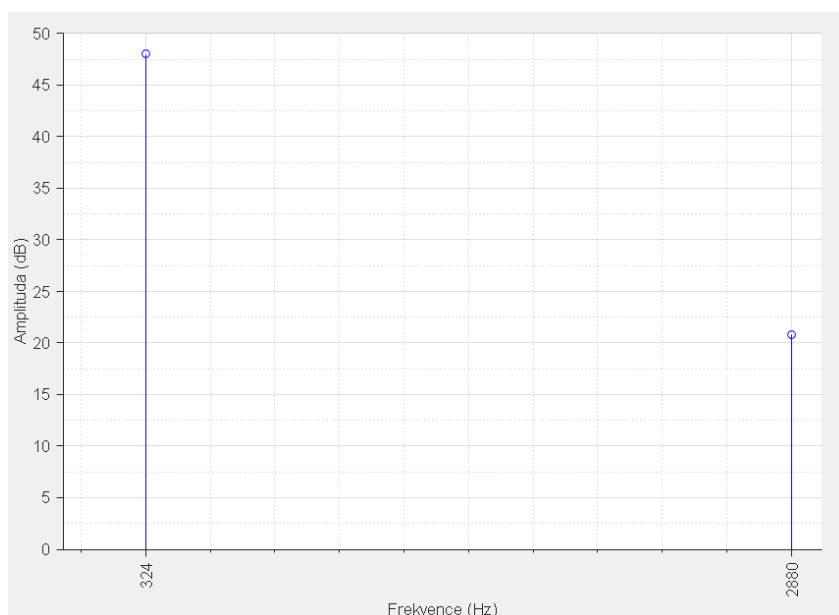
Obr. 8.3: Spektrum pro housle fis<sup>1</sup> akordu  $H$  dur MSV.



Obr. 8.4: Spektrum pro trubku h akordu  $H$  dur VMS.

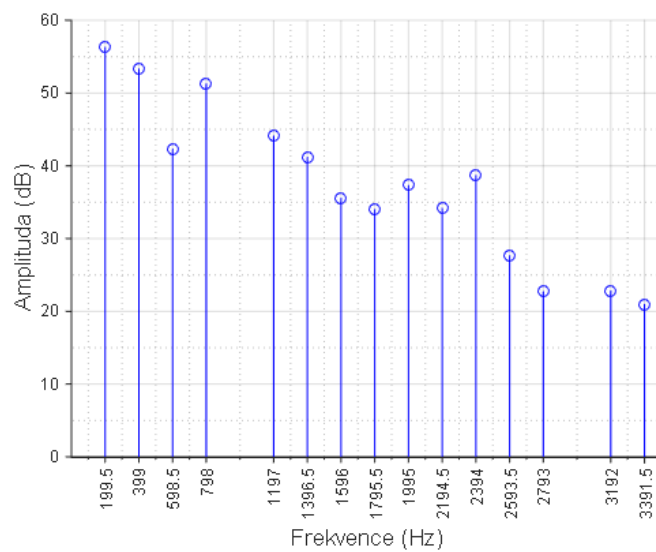


Obr. 8.5: Spektrum pro kytaru fis<sup>1</sup> akordu *H* dur VMS.

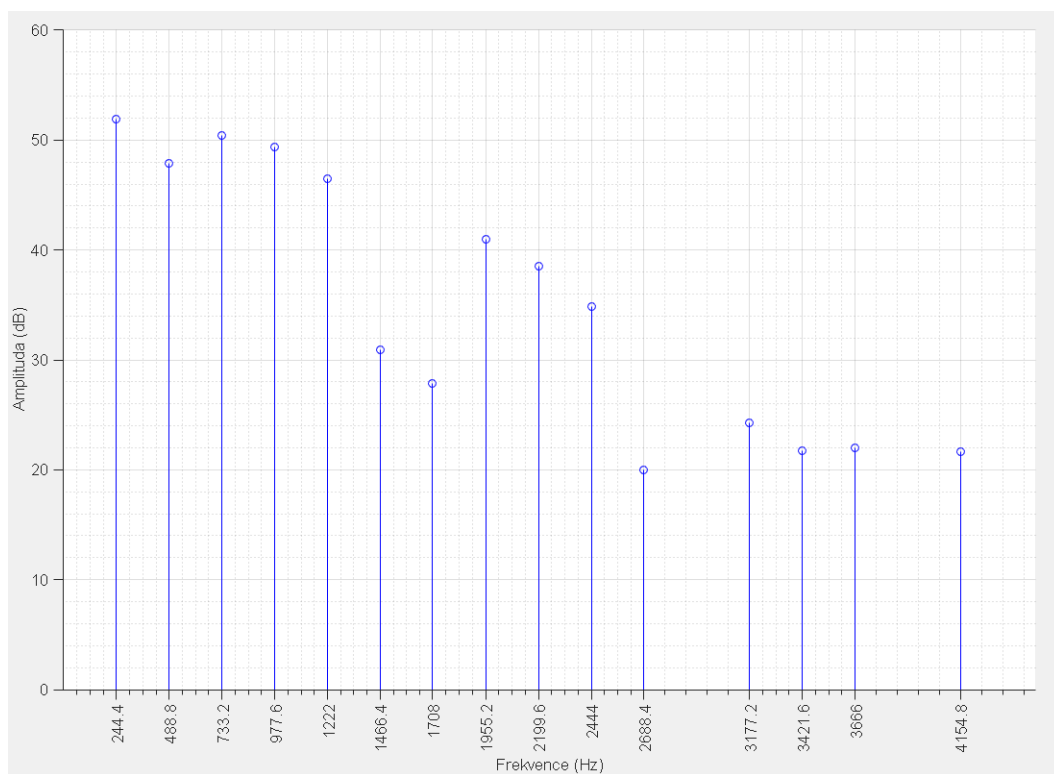


Obr. 8.6: Spektrum pro marimbu dis<sup>1</sup> akordu *H* dur VMS.

## 8.2 Klastr

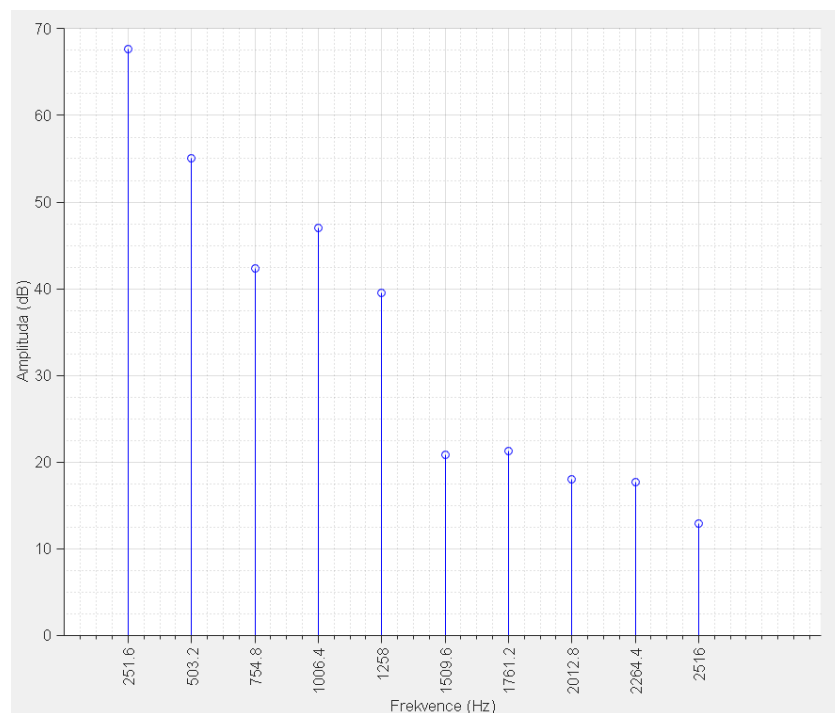


Obr. 8.7: Spektrum pro cello a z klastru.

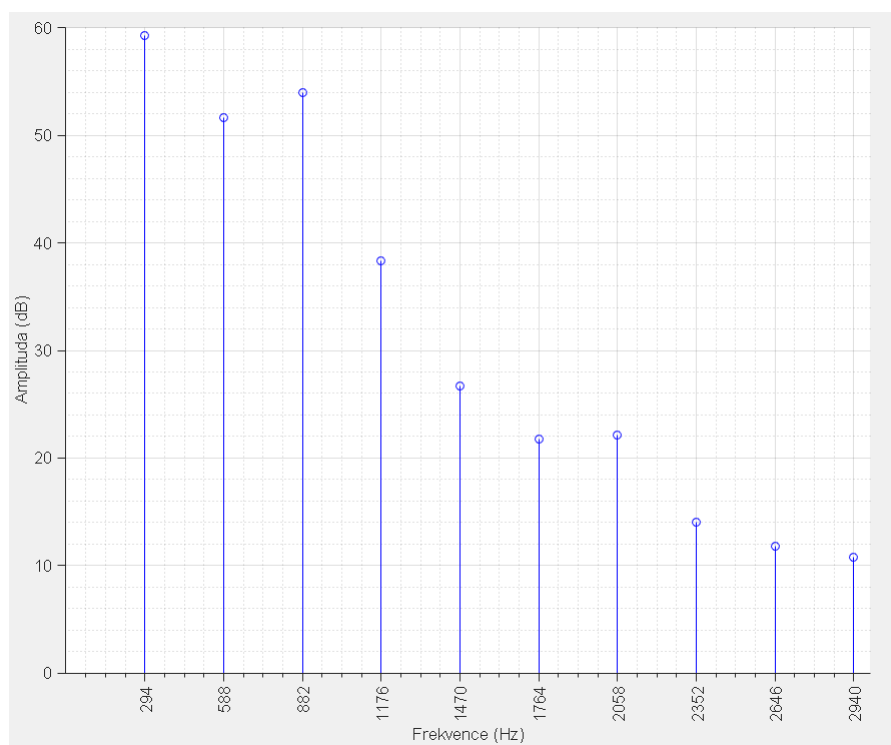


Obr. 8.8: Spektrum pro anglický roh h z klastru.

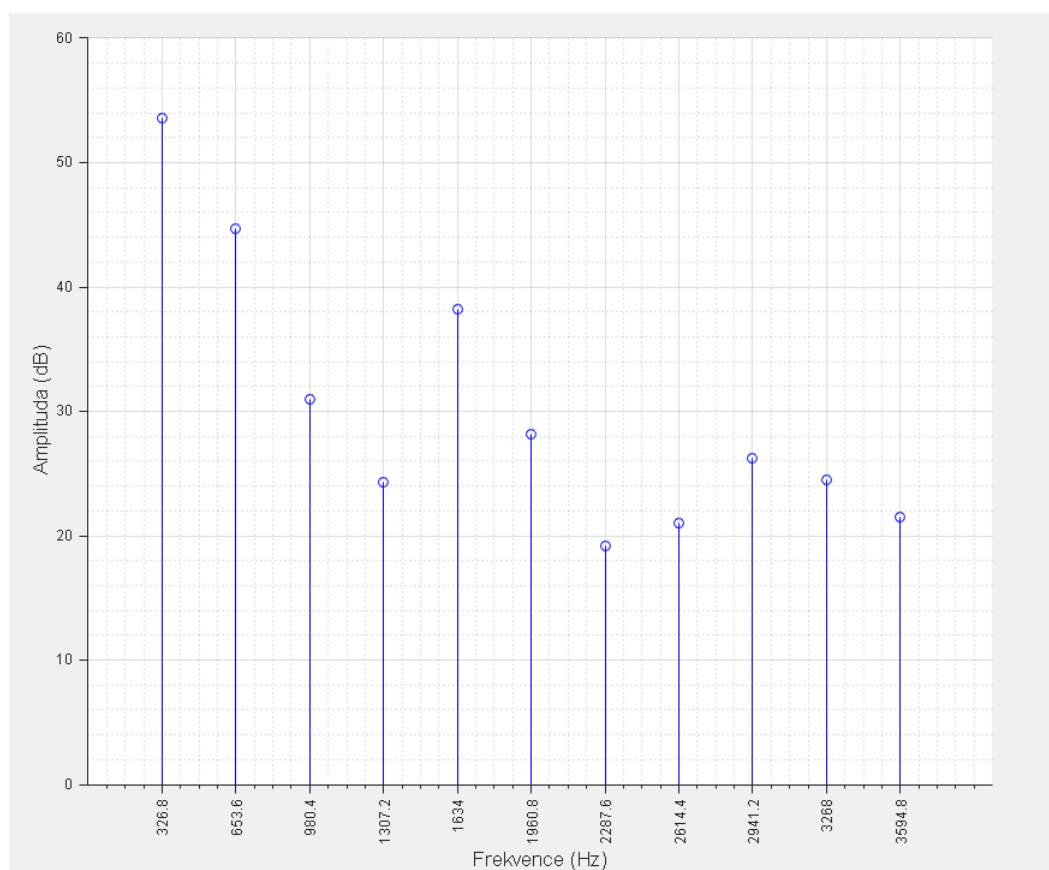




Obr. 8.9: Spektrum pro lesní roh  $c^1$  z klastru.

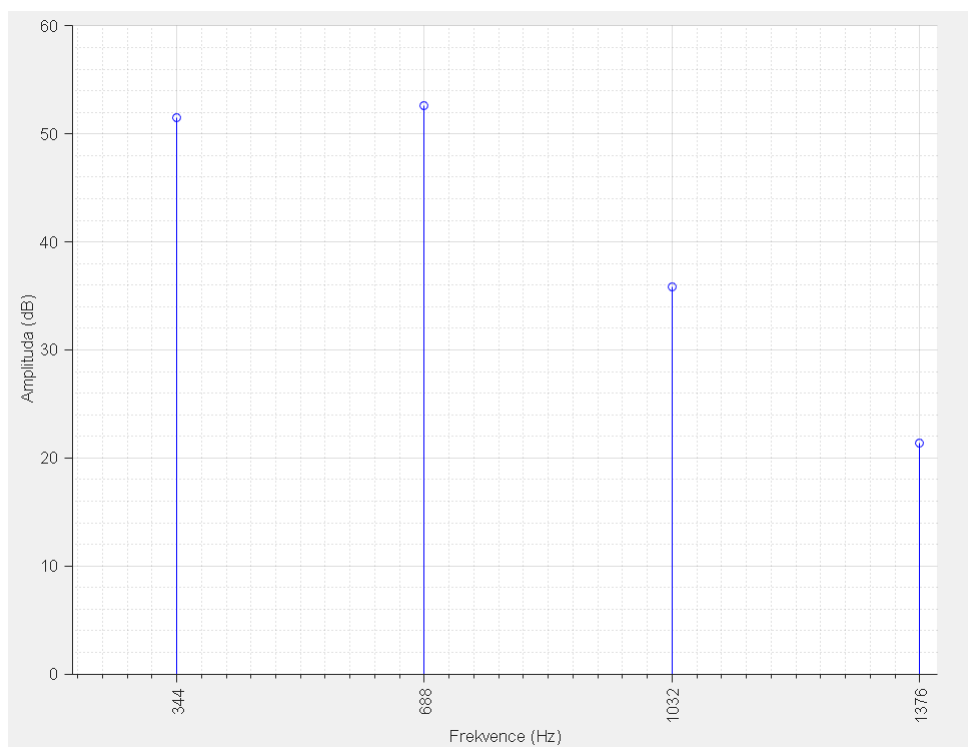


Obr. 8.10: Spektrum pro pozoun  $d^1$  z klastru.

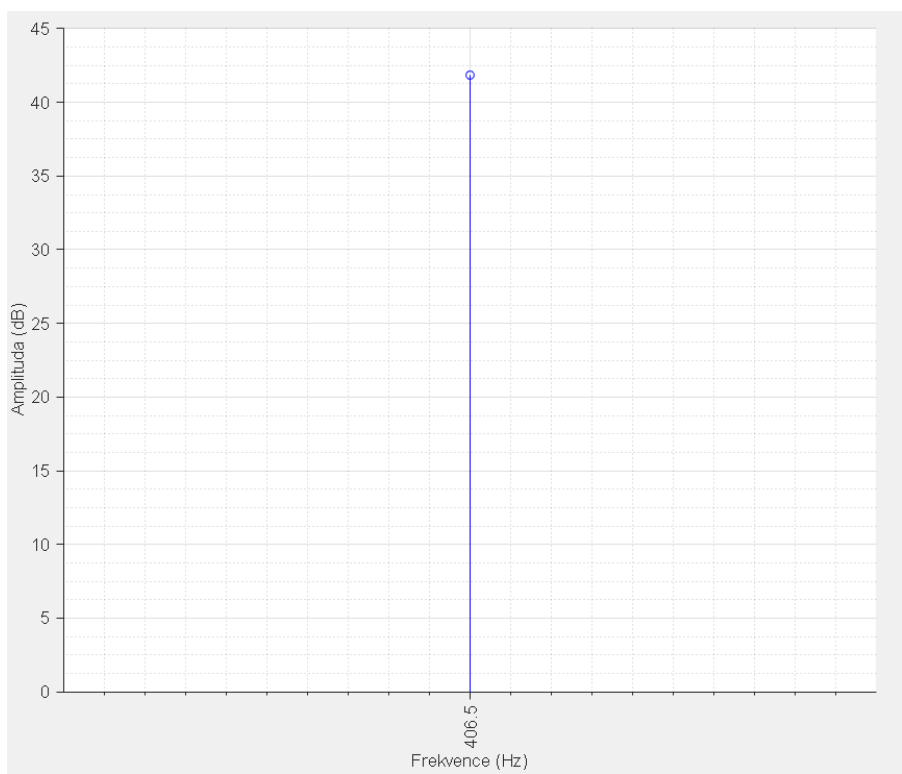


Obr. 8.11: Spektrum pro klavír  $e^1$  z klastru.

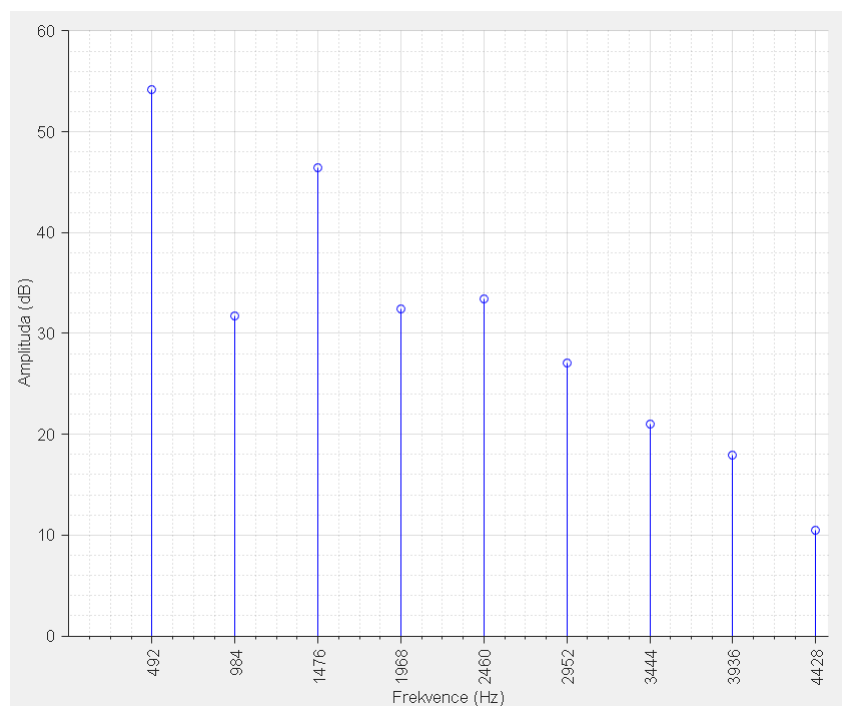
## 8.3 Nástroje z kategorie M



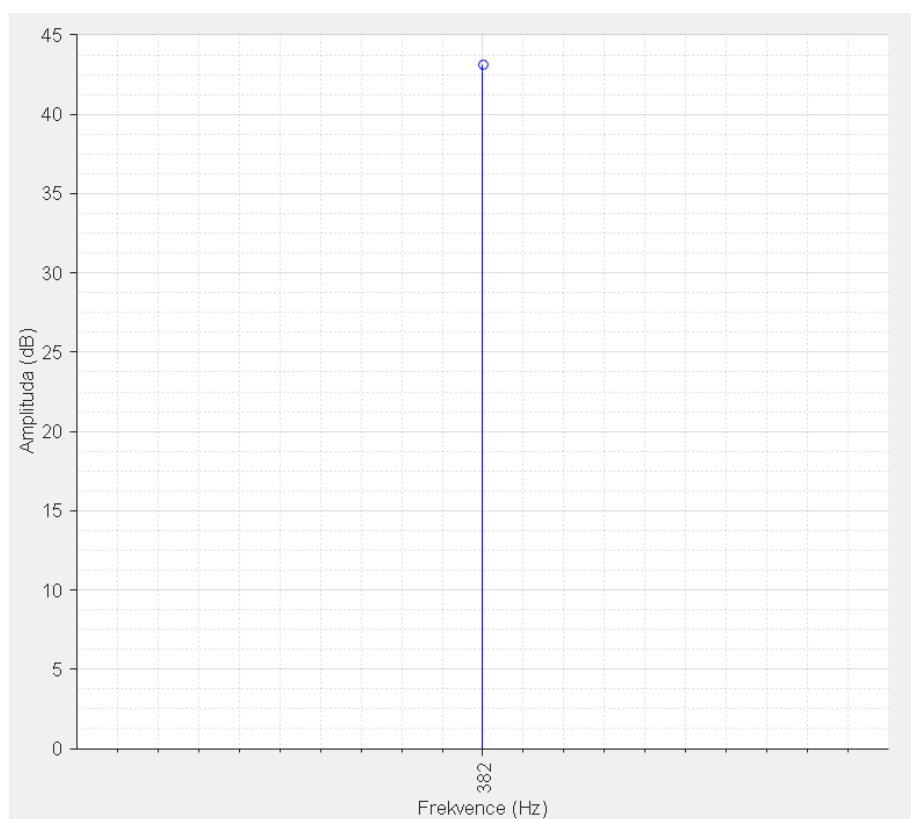
Obr. 8.12: Spektrum pro fagot  $f^1$  akordu  $Fmi^{-5}$ .



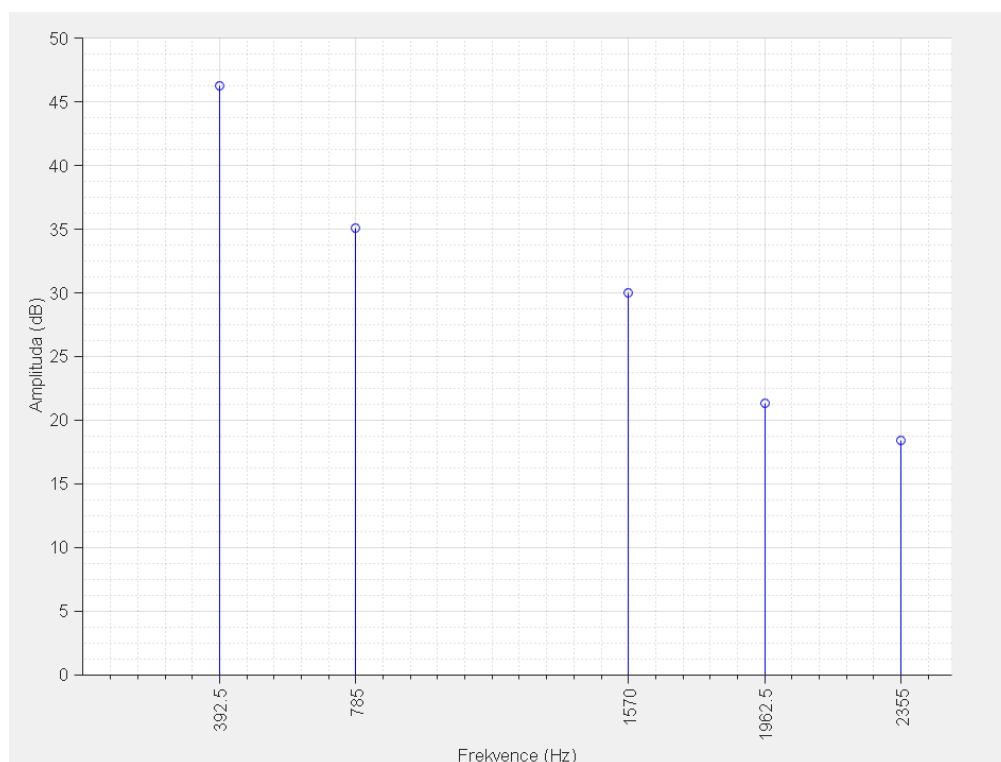
Obr. 8.13: Spektrum pro marimbu  $as^1$  akordu  $Fmi^{-5}$ .



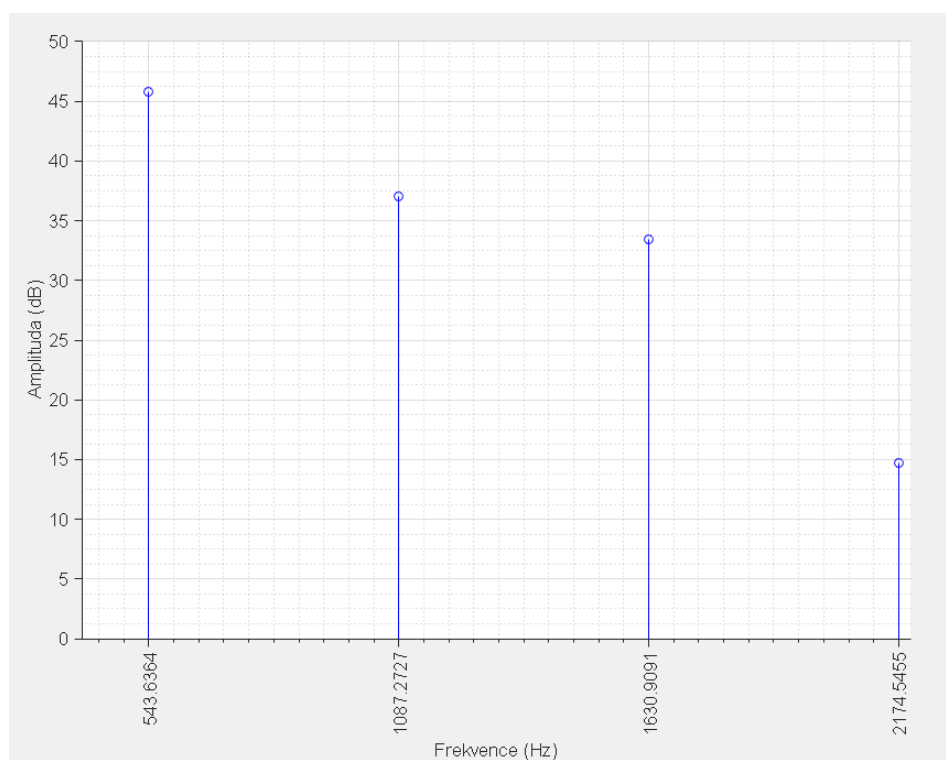
Obr. 8.14: Spektrum pro klarinet ces<sup>2</sup> akordu  $Fmi^{-5}$ .



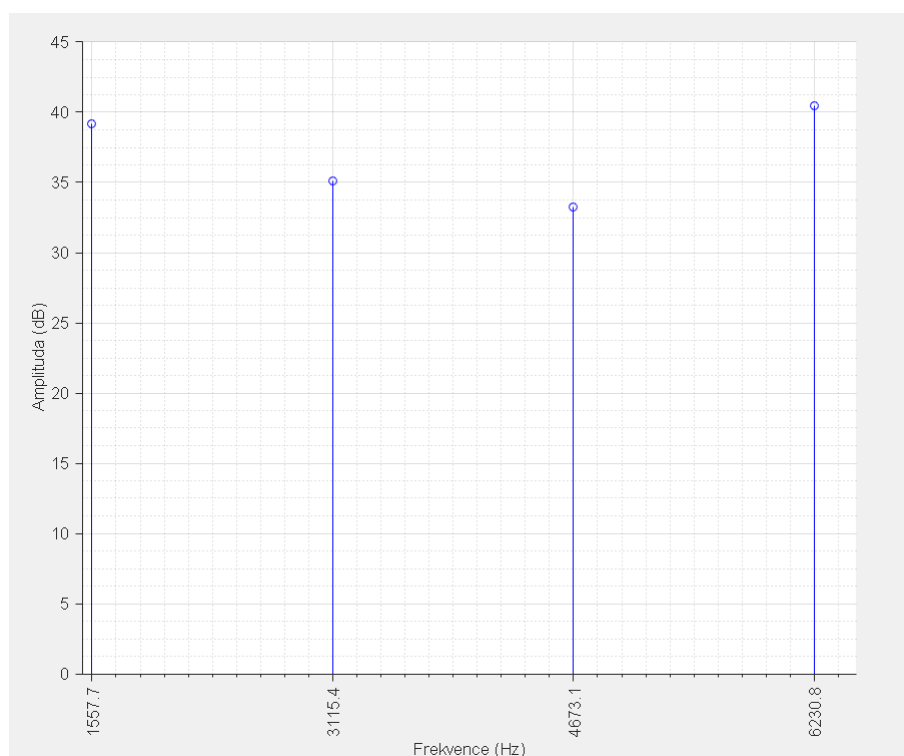
Obr. 8.15: Spektrum pro sinus g<sup>1</sup> akordu  $Gmi^{-5}$ .



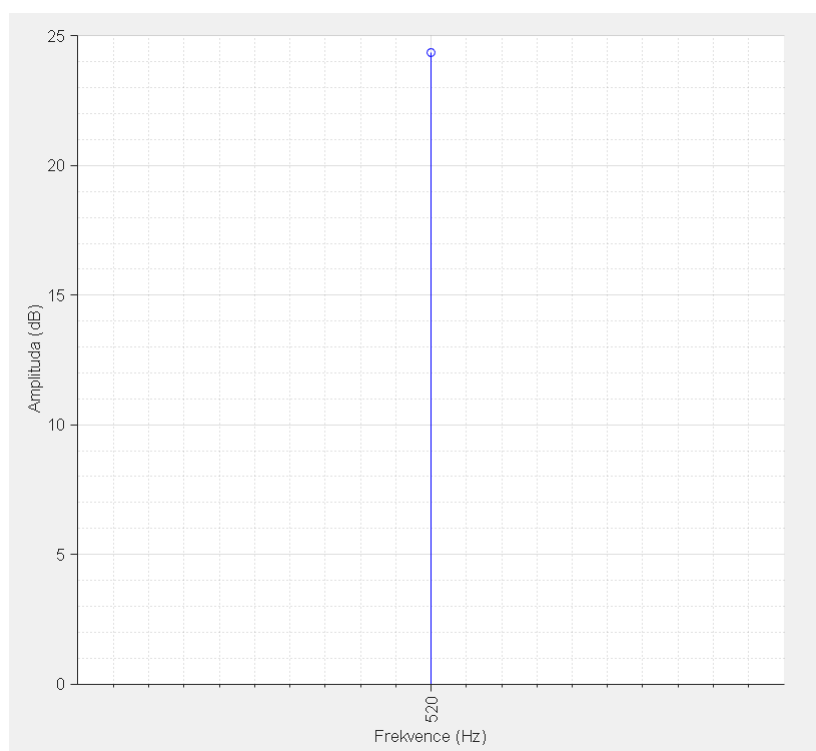
Obr. 8.16: Spektrum pro harfu hes<sup>1</sup> akordu  $Gmi^{-5}$ .



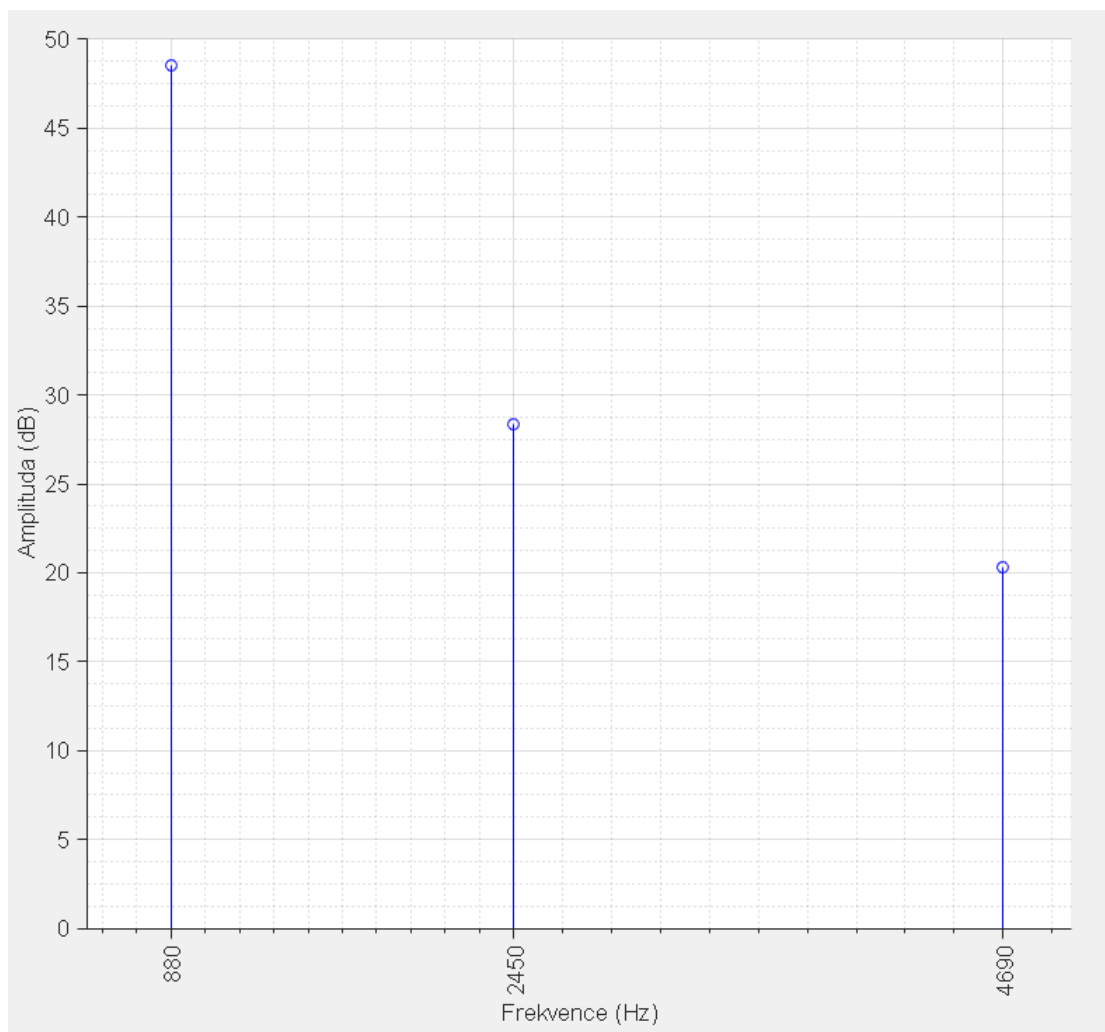
Obr. 8.17: Spektrum pro příčnou flétu des<sup>2</sup> akordu  $Gmi^{-5}$ .



Obr. 8.18: Spektrum pro příčnou trianl es<sup>2</sup> akordu Ami<sup>-5</sup>.



Obr. 8.19: Spektrum pro vibrafon c<sup>2</sup> akordu Ami<sup>-5</sup>.



Obr. 8.20: Spektrum pro zvonkohru a<sup>1</sup> akordu Ami<sup>-5</sup>.

## 9 Závěr

Tato práce se zabývala psychoakustickým vnímáním shodně instrumentovaných akordů různě rozložených ve stereu. Také se zabývala neshodně instrumentovanými akordy různě rozloženými ve stereu. Tyto akordy byly v práci představeny a zkoumány na 72 posluchačích, kteří je podle škály srozumitelnosti ohodnotili.

Ukázalo se, že v akordech, kdy každý jednotlivý tón hrál nástroj z jiné kategorie pro tvorbu vyšších harmonických složek, se nejlépe prosazují nástroje, které jsou z kategorie **V** produkujících 17 a více vyšších harmonických složek. Pro nástroj, který je z kategorie **M** pro tvorbu 1 – 8 vyšších harmonických složek, se jeví jako nejlepší umístění pro srozumitelnost na pozici L100 ve stereo rozložení L100 0 R100, tedy pokud je od všech ostatních nástrojů co nejvíc daleko. Pro nástroje z kategorie produkujících střední počet **S** vyšších harmonických složek (9 – 16) se ukázalo, že nejlépe srozumitelné a rozpoznatelné jsou na pozicích, kdy jsou od nástrojů rovněž nejdále.

V případě, kdy hrají pouze nástroje z kategorie **S** se ukázalo, že celková srozumitelnost akordu je nejhorší v případě umístění všech nástrojů doprava na pozici R100 pro poslech jedním uchem. Naopak nejlepší dle očekávání bylo umístění co nejrovnoměrnější po stereo ose L100 L50 0 R50 R100. Strunné nástroje se projeví jako mnohem více rozpoznatelné než nástroje dechové, což přisuzuji tomu, že konkrétně klavír a violoncello jsou mnohem známější než anglický roh, lesní roh a pozoun.

Co se týká nástrojů pouze z kategorie **M**, největším zjištěním je to, že nejvíce srozumitelné jsou nástroje, které jsou nejvíce obecně známé. Navíc se potvrzuje, že nástroje, které produkují více vyšších harmonických složek, maskují v rozložení 0 ty, které těchto složek tvoří méně.

U akordu A7 sus4 se nepotvrdil předpoklad, že rozložení L100 L35 R35 R100 by mělo být pro posluchače nejsrozumitelnější. Ba naopak. Nejlépe vyšlo rozložení 0. Housle jako zástupce kategorie **V** se prosadily ze všech nástrojů nejlépe. Maskovací účinek se ale nepotvrdil, protože hoboj a klarinet z kategorie **S** byly o tón od sebe (tedy téměř stejně intervalově daleko od houslí) a klarinet uhádl téměř stejný počet posluchačů jako housle. V případě hoboje dle mého názoru nešlo o maskování ze strany klarinetu, ale poznalo ho málo lidí, protože je podle mě obecně méně známý. Naopak sinus byl jistě zamaskovaný v rozložení 0 a L50 L35 R35 R50, v ostatních dvou v podstatě také, protože jej uhádla pouze 4% posluchačů. V akordu C phryg v.7 se potvrdila teorie, že v nejlepším rozložení L100 L35 R35 R100 byl hoboj houslemi nejméně maskován. Housle opět ve všech případech byly nejlépe rozpoznatelné. Klarinet byl nejvíce poznat v rozložení L75 L75 R75 R75, kdy byl na pravé straně umístěn na stejné pozici jako sinus a tedy nejdále od ostatních nástrojů. Sinus byl znovu téměř zamaskován klarinetem.



Kromě uvedených výsledků můžu prohlásit, že je důležité vědět, při jaké dynamice určitý nástroj produkuje jaké množství vyšších harmonických složek. Podle toho se dají nástroje rozložit na stereo ose, aby byly co nejlépe srozumitelné. Také záleží na tom, jaké nástroje obecně lidé znají. Pro srozumitelnost jednotlivých nástrojů se totiž ukázalo, že posluchači uváděli především nástroje, které jsou všeobecně nejvíce známé, jako například klarinet, ačkoliv zároveň s nimi mohly znít jiné nástroje, které mají podobnou barvu, jako například hoboj. Důležité je ale upozornit na to, že výsledky se vztahují pouze na konkrétní akordy a použité nástroje při dané dynamice. Obecně můžu pouze prohlásit, že nástroje, které produkují 17 a více vyšších harmonických složek, se v akordech prosadí nejlépe.

Přestože poslech na uvedená sluchátka zřejmě výsledky nijak neovlivnil, domnívám se, že při použití jiných sluchátek by mohl, protože by mohla zesilovat frekvence, kde zrovna některý nástroj oproti ostatním v rámci akordu hraje.

Výsledky mohly být ovlivněny i dalšími faktory, například aplikací efektů na nástroje. V takovém případě by se daly očekávat výsledky odlišné, avšak tyto faktory nebyly předmětem mého výzkumu. Stejně tak je nutno zmínit, že využití jiných zvukových bank by taktéž mohlo mít vliv na jiná hodnocení nástrojů.

# Literatura

- [1] MELKA, A. *Základy experimentální psychoakustiky*. 1. vydání. V Praze: Akademie múzických umění, 2005. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. 328 s. ISBN 80-7331-043-0
- [2] ŠTĚPÁNEK, J., MORAVEC, O. *Barva hudebního zvuku a její slovní popis*. V Praze: Akademie múzických umění, 2005. Výzkumné centrum hudební akustiky Zvukového studia Hudební fakulty AMU. Dostupné z URL: <<https://docplayer.cz/8949984-Barva-hudebniho-zvuku-a-jeji-slovni-popis.html>>.
- [3] SYROVÝ, V. *Hudební akustika*. 3. doplněné vydání. V Praze: Akademie múzických umění. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. 440 s. 2013. ISBN 978-80-7331-297-8
- [4] SMĚKAL, Z. *Analýza signálů a soustav – BASS*: skripta. 1. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2012. 251 s. ISBN 978-80-7331-127-8.
- [5] SCHIMMEL, J. *Elektroakustika*: elektronická skripta. 1. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 167 s. ISBN 978-80-214-4716-5.
- [6] ZENKL, L. *ABC hudební nauky*. 7. vydání, Praha: Editio Bärenreiter, 1999. 197 s. ISBN 80-86385-21-3
- [7] HAVLÍK, R. *Vliv binaurálního slyšení na srozumitelnost řeči při použití kompetitivního šumového signálu*. Disertační práce. 2010. 100 s.
- [8] SEDLÁČEK, K. *Základy audiologie*. SZN, Praha. 1956. 424 s.
- [9] SINĚLNIKOV, R.D. *Atlas anatomie člověka*. 3. díl. Avicenum/Mir, 1982. 399 s.
- [10] ENGSTRÖM, H; ENGSTRÖM, B. *Structure and function of the inner ear*. Uppsala, Sweden, May 1976
- [11] SYKA, J.; VOLDŘICH, L.; VRABEC, F. *Fyziologie a patofyziologie zraku a sluchu*. Avicenum, 1981. 322 s.
- [12] HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, J *FYZIKA: Vysokoškolská učebnice obecné fyziky* 6. vydání, Nakladatelství VUTIUM a PROMETHEUS Praha. 2001. 1278 s. ISBN 80-214-1869-9

- [13] OWSINSKI, B. *The Mixing Engineer's Handbook* 3. vydání. Course technology PTR. 2014. 402 s.
- [14] ZAMAZAL, V. *Hudební nástroje před mikrofonem*. 1. vydání, Praha: Editio Supraphon, 1975. 184 s.
- [15] MODR, A. *Hudební nástroje*. 1. vydání, Praha: Editio Bärenreiter, 2017. 284 s. ISBN 978-80-863-8512-9
- [16] BEATO, R. *The Beato Book*. 2018. 461 s. Dostupné z URL: <<https://rickbeato.com/products/the-beato-book>>.
- [17] SYROVÝ, V. *Hudební zvuk*. 2. vydání. V Praze: Akademie múzických umění. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. 2014. 318 s. ISBN 978-80-7331-323-4
- [18] SMĚLÝ, P. *Analýza časově proměnného spektra klavírů*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 80 s. Vedoucí práce byl MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.
- [19] ZAPLATÍLEK, K.; DOŇAR, B. *MATLAB: začínáme se signály*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0200-0.
- [20] NOVÁK, A. *Foniatric a pedaudiologie I.: Poruchy komunikačního procesu způsobené sluchovými vadami*. Unitisk, Praha. 1994. 131 s.
- [21] Definice pilotního výzkumu. Dostupné z URL: <<https://www.stemmark.cz/encyklopedie-pilot-pilotni-vyzkum/>>.
- [22] WILSON, K; KORN, J. H. *Attention During Lectures: Beyond Ten Minutes*. Saint Louis University. 2007. s. 85 – 89.
- [23] KOUKOLÍK, F. *Mozek a jeho duše*. 4. rozšířené a přepracované vydání. Praha: Galen, 2014. 455 s. ISBN 978-80-7492-069-1
- [24] ZAPLATÍLEK, K. *MATLAB: průvodce začínajícího uživatele*. 1. vydání. Brno: Tribun EU, 2011. 87 s. ISBN 978-80-263-0014-4.
- [25] ZAPLATÍLEK, K. *MATLAB: tvorba grafického uživatelského rozhraní*. Brno: Tribun EU, 2014. ISBN 978-80-263-0861-4.

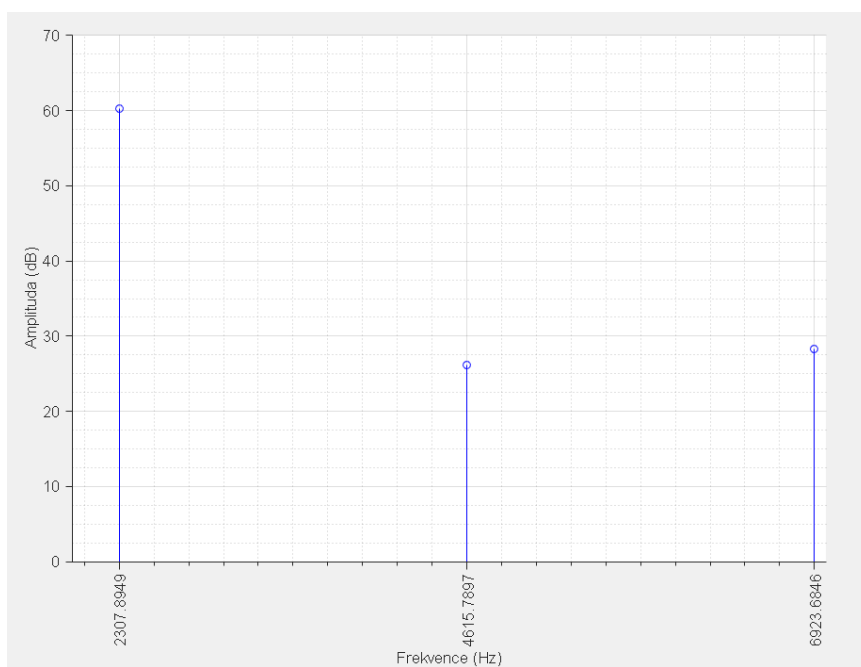
# Seznam symbolů, veličin a zkratk

DFT (diskrétní Fourierova transformace), FFT (rychlá Fourierova transformace)

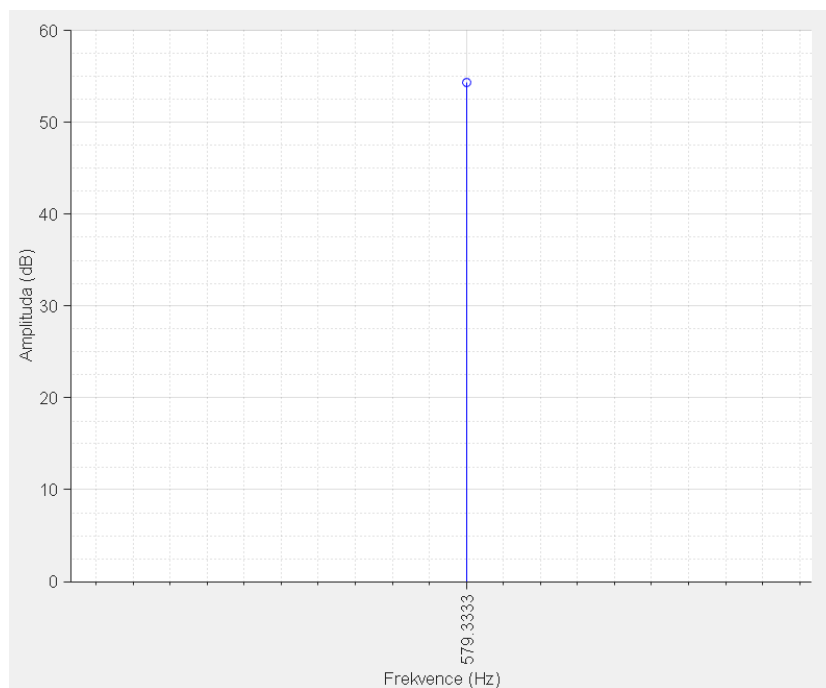
# Seznam příloh

A Přílohy	69
B Obsah přiloženého CD	75

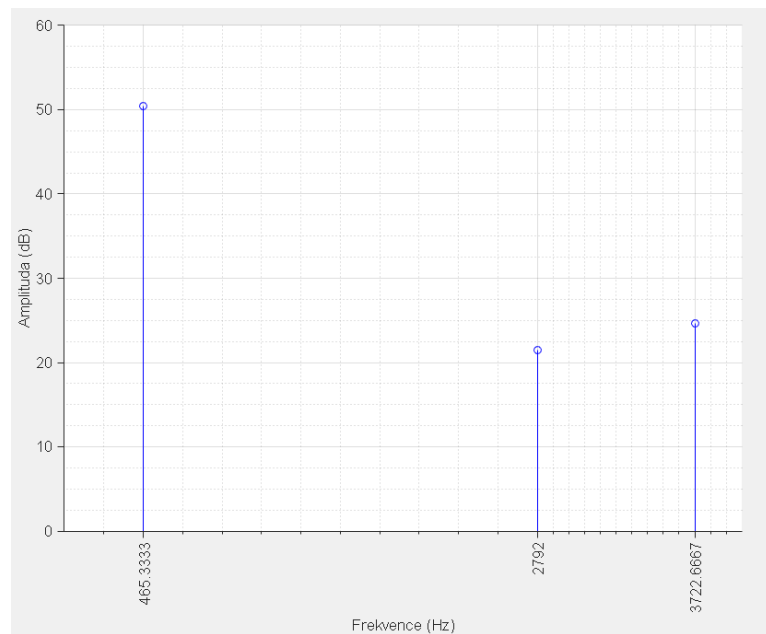
## A Přílohy



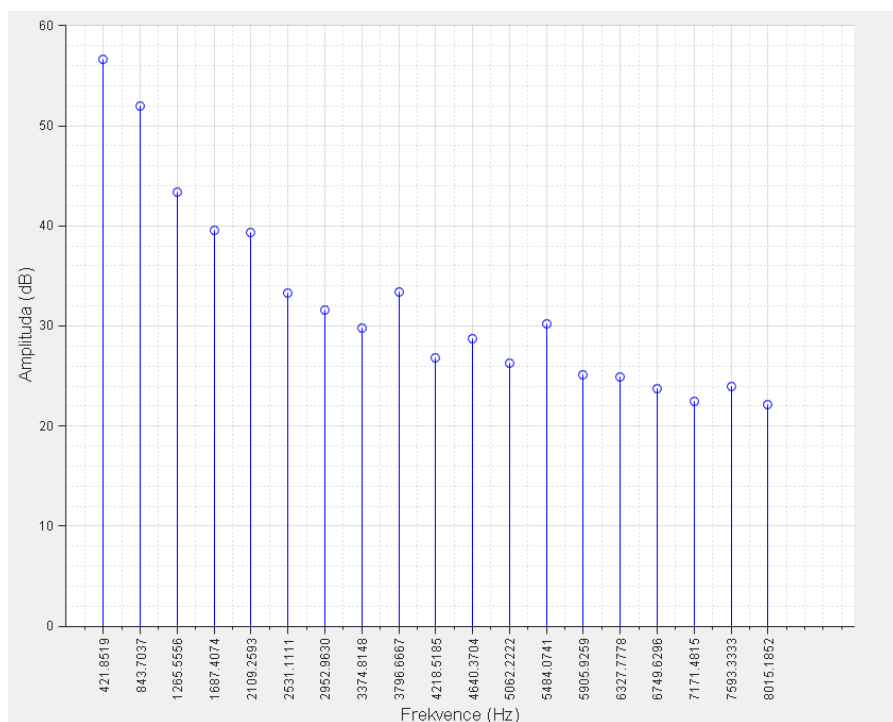
Obr. A.1: Spektrum pro pikolu  $f^2$  akordu  $Hmi^{-5}$ .



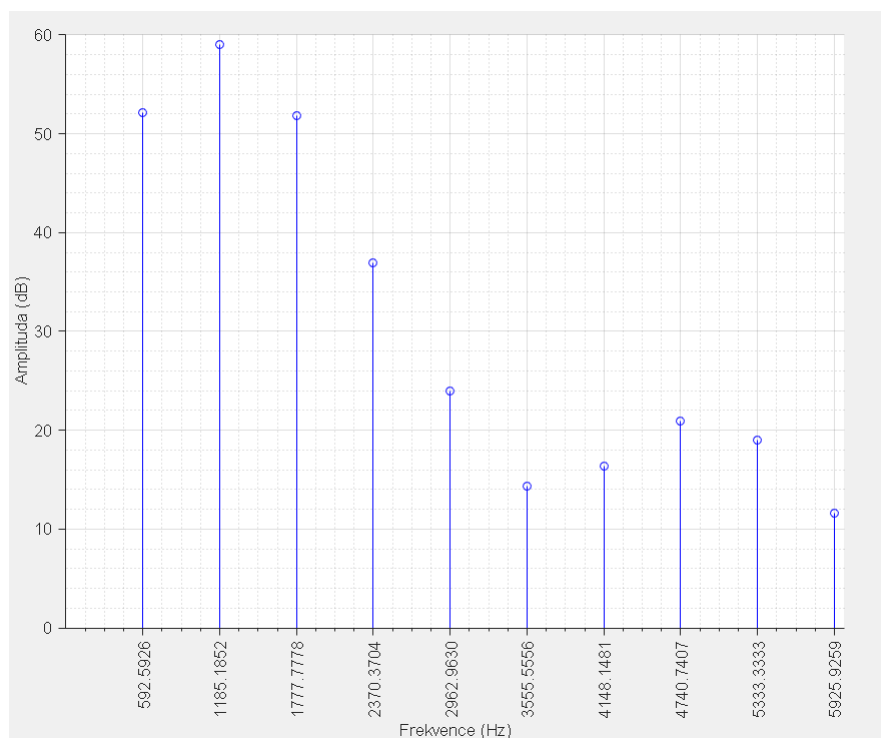
Obr. A.2: Spektrum pro okarinu  $d^2$  akordu  $Hmi^{-5}$ .



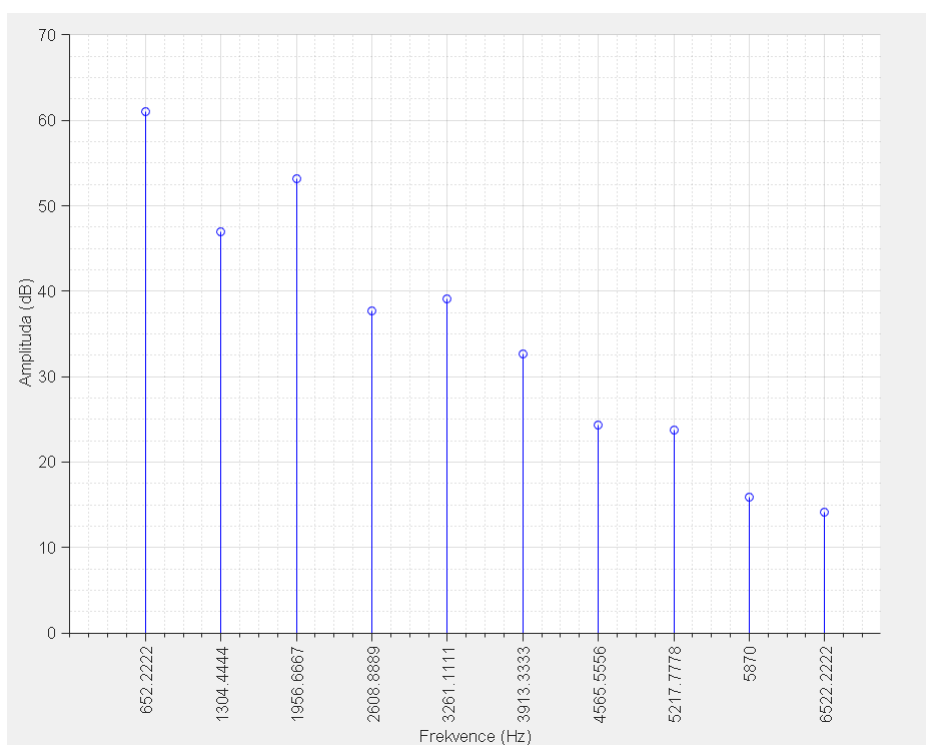
Obr. A.3: Spektrum pro celestu  $h^1$  akordu  $Hmi^{-5}$ .



Obr. A.4: Spektrum pro housle  $a^1$  akordu  $A7\ sus4$ .

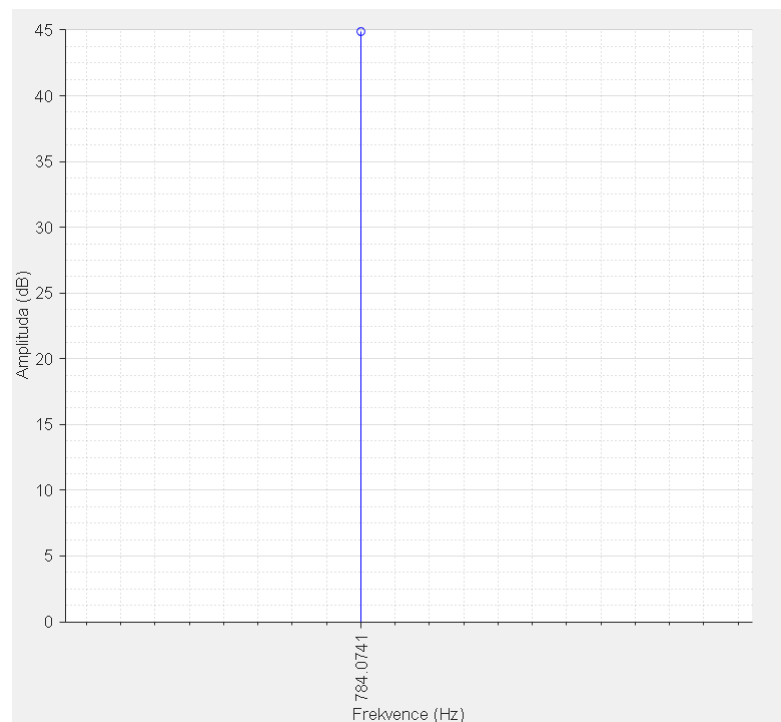


Obr. A.5: Spektrum pro hobo  $d^2$  akordu A7 sus4.

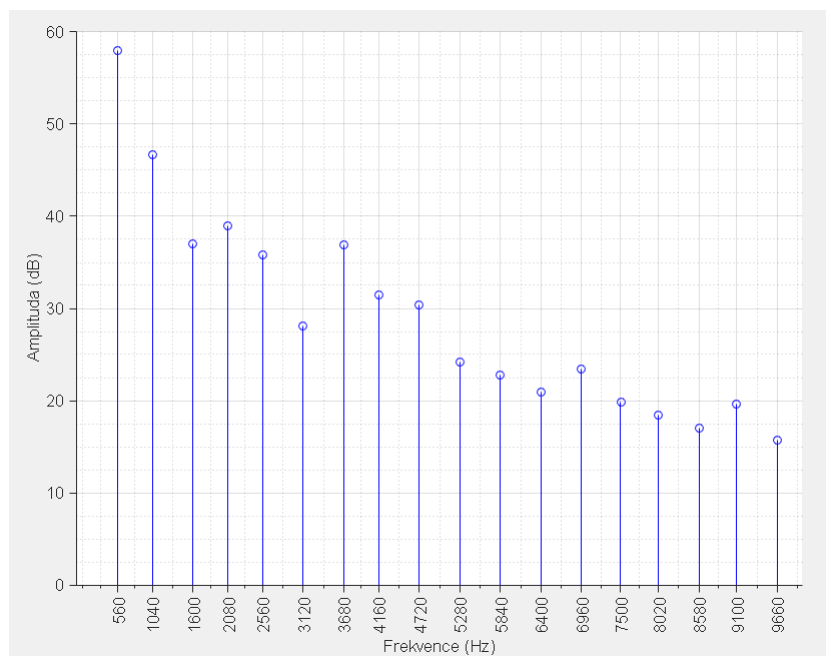


Obr. A.6: Spektrum pro klarinet  $e^2$  akordu A7 sus4.

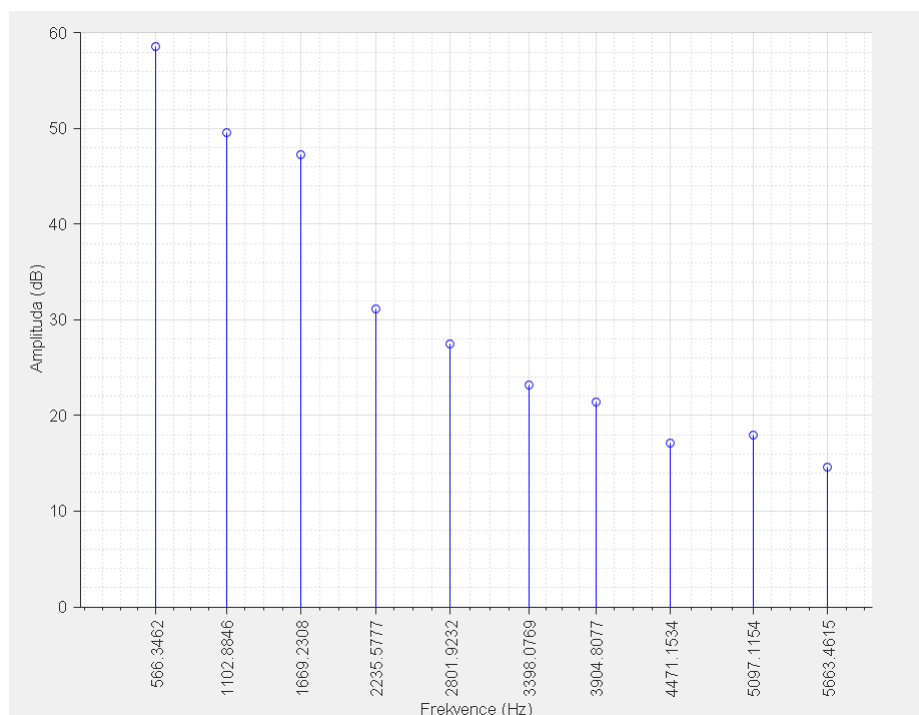




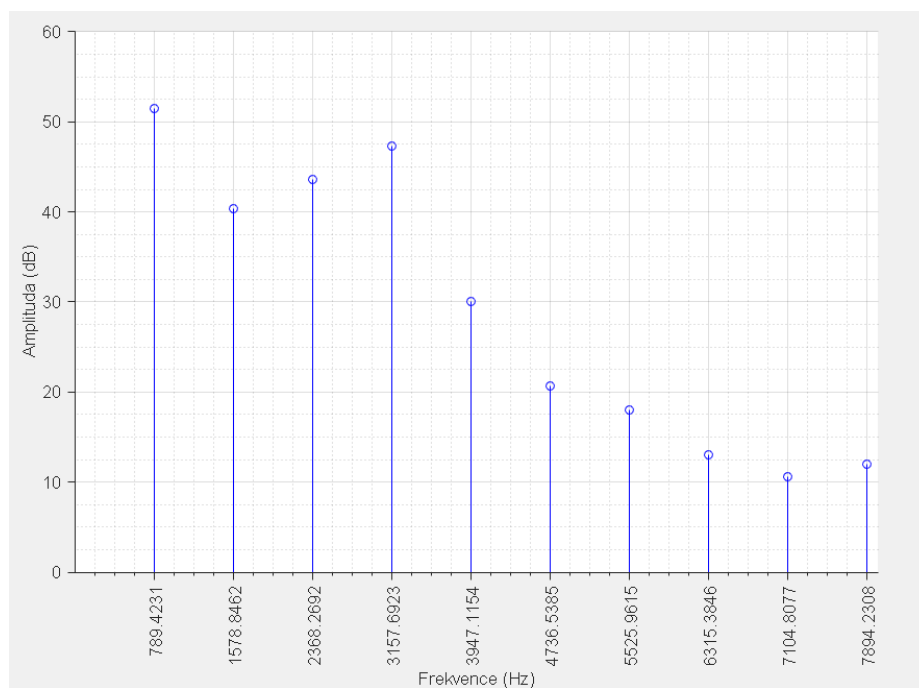
Obr. A.7: Spektrum pro sinus  $g^2$  akordu A7 sus4.



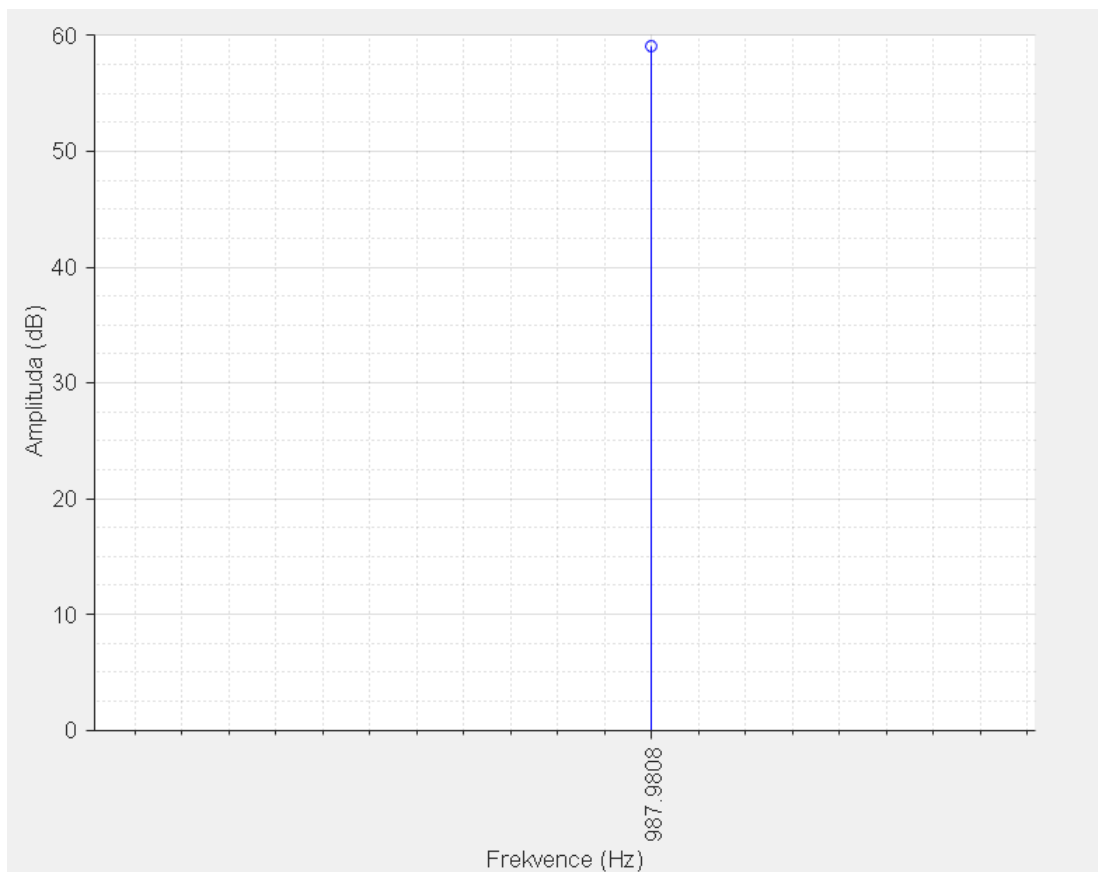
Obr. A.8: Spektrum pro housle  $c^2$  akordu C phryg v.7.



Obr. A.9: Spektrum pro hobo  $c^2$  akordu  $C$  phryg v.7.



Obr. A.10: Spektrum pro klarinet  $g^2$  akordu  $C$  phryg v.7.



Obr. A.11: Spektrum pro sinus  $h^2$  akordu  $C$  phryg v.7.

## B Obsah přiloženého CD

Přiložené CD obsahuje skripty pro programovací jazyk Matlab verze 2014b.

<code>GUIdotaznik.m</code>	.....	grafický dotazník
<code>prumery.m</code>	.....	skript pro výpočet aritmetických průměrů a procent uhádnutí nástrojů
<code>urcovaniharmonickych.m</code>	.....	skript pro určování vyšších harmonických složek